

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

Ingegneria Energetica Nucleare e del Controllo Ambientale

Ciclo XXVII

Settore Concorsuale di afferenza: 09/C2

Settore Scientifico Disciplinare: ING-IND/18

**CALCOLO DI SEZIONI D'URTO EFFICACI DI RIFLETTORE
IN SISTEMI PWR DI TERZA GENERAZIONE**

Candidato: Antonio Guglielmelli

Coordinatore Dottorato

Prof. Vincenzo Parenti Castelli

Tutor

Prof. Marco Sumini

Co-Tutor

**Ing. Federico Rocchi
ENEA-UTFISSM**

Esame finale anno 2015

A mia Madre....

Ringraziamenti

Il mio primo ringraziamento va a Federico Rocchi senza il cui continuo supporto poco di quello che è stato realizzato sarebbe stato possibile. Voglio anche fare un doveroso ringraziamento al prof. Marco Sumini per avermi seguito nel percorso di dottorato e “spronato” ad affrontare le sfide della ricerca. Ringrazio ancora Giacomo Grasso e Carlo Petrovich per essere intervenuti, in tempi e modi diversi, quando il bisogno era maggiore. In ultimo, ma non per importanza, uno speciale ringraziamento va all’ Ing. Franca Padoani e all’ Ing. Paride Meloni per aver reso possibile la mia permanenza in ENEA per tre lunghi anni.

INDICE

Sommario.....	
Introduzione.....	1
1. Aspetti teorici.....	8
1.1.Introduzione.....	8
1.2.Assembly discontinuity Factor (ADF) per sistemi assembly/riflettore.....	8
1.3.Modelli di rappresentazione dei riflettori.....	12
1.3.1. Metodo di Reuss-Nissan.....	12
1.3.2. Metodo di Mondot (BETA).....	13
2. Strumenti di calcolo e dati nucleari.....	15
2.1.Introduzione.....	15
2.2.T-NEWT.....	15
2.2.1. Calcoli di autoschermo.....	16
2.2.1.1. Sequenza funzionali NITWTAL e BONAMI.....	21
2.2.1.2. Sequenza funzionale CENTRM.....	26
2.2.2. Calcoli di trasporto.....	30
2.3.SERPENT.....	40
2.3.1. Geometria.....	40
2.3.2. Materiali.....	41
2.3.3. Condizioni al contorno.....	41

2.3.4. Interazioni fisiche.....	42
2.3.5. Generazione delle costanti di gruppo.....	43
3. Il riflettore del reattore di ricerca RB3.....	44
3.1.Introduzione.....	44
3.2.Caratteristiche tecniche e di funzionamento.....	44
3.3.Calcoli neutronici.....	46
3.3.1. Calcoli di cella.....	47
3.3.2. Calcoli di riflettore.....	50
4. Il riflettore dell'unità PWR TMI-I.....	55
4.1.Introduzione.....	55
4.2.Il Benchmark NEA-NSC-DOC(2013)/7.....	55
4.3.Descrizione della geometria e dei materiali.....	56
4.4.Metodologia.....	59
4.4.1. Codice deterministico T-NEWT.....	59
4.4.2. Codice Monte Carlo - Serpent 2.0.....	61
4.5.Risultati.....	62
4.6.Confronti dei risultati ottenuti con quelli del Benchmark.....	68
4.7.Conclusioni.....	70
5. Modelli di riflettore PWR.....	71
5.1.Introduzione.....	71
5.2.Il riflettore RISO (1981).....	71

5.2.1. Configurazione ad un quarto di asse (1).....	77
5.2.2. Configurazione media (2).....	79
5.2.3. Risultati.....	81
5.3. Il riflettore EPRI (1984).....	82
5.3.1. Configurazione omogenea.....	83
5.3.2. Configurazione eterogenea.....	85
5.3.3. Risultati.....	88
5.4. Il riflettore ENEA (2011).....	92
5.4.1. Configurazione PWR.....	94
5.4.2. Configurazione BWR.....	95
5.5. Il riflettore BEAVRS (2013).....	98
5.5.1. Risultati.....	103

6. Il riflettore GENIII+.....107

6.1. Il riflettore standard e quello pesante.....	107
6.2. Analisi di sensitività.....	114
6.2.1. Convergenza numerica.....	115
6.2.2. Ordine di quadratura e di scattering.....	116
6.2.3. Mesh computazionali.....	116
6.2.4. Concentrazione di boro.....	117
6.2.5. Condizioni operative.....	120
6.2.6. Librerie di sezioni d'urto.....	122
6.2.7. Temperatura del riflettore.....	124

6.2.8. Configurazione omogenea.....	126
6.3. Configurazione geometrica a più assembly.....	130
6.4. Il riflettore EPR.....	138
6.4.1. Zona 3.....	142
6.4.2. Zona 4.....	145
6.4.3. Zona 5.....	148
6.4.4. Zona 6.....	151
6.4.5. Zona 7.....	154
6.5. Confronti SCALE 6.1.3 – SERPENT 2.0.....	157
6.6. Color set.....	159
APPENDICE I.....	163
Lista delle Figure.....	178
Lista delle Tabelle.....	186
Bibliografia.....	190

Sommario

La corretta modellizzazione della zona del riflettore dei sistemi GEN III+ è un passaggio fondamentale per un'accurata predizione dei parametri di cella il cui valore influenza direttamente la distribuzione di potenza su tutto il nocciolo. Tale esigenza si è resa ancora più stringente dopo la constatazione che il fenomeno del "*tilt power*" risulta essere più amplificato nei noccioli nucleari equipaggiati con un riflettore pesante. Per tali ragioni, nel presente lavoro di tesi si è dedicata particolare attenzione alle metodiche di modellizzazione ed alla generazione delle sezioni d'urto efficaci omogenee ed agli assembly discontinuity factors (ADF) nella zona di riflessione. Il codice deterministico utilizzato per il calcolo è il modulo funzionale T-NEWT presente nella suite di SCALE 6.1.3.

La notevole differenza nelle proprietà neutroniche associata ad un'elevata eterogeneità geometrica tra un nocciolo ed un riflettore hanno suggerito di effettuare un'analisi preliminare sul sistema riflettente GEN II proposto nel benchmark NEA-NSC-DOC (2013) per testare la capacità di SCALE 6.1.3 di effettuare un corretto calcolo di cella adottando una modellizzazione monodimensionale assembly/riflettore. I risultati ottenuti, dopo esser stati confrontati con quelli presentati nel benchmark e quelli valutati attraverso il codice Monte Carlo SERPENT 2.0, hanno confermato la capacità di calcolo di SCALE 6.1.3.

L'analisi sulla modellizzazione dei sistemi riflettenti GEN III+ è stata effettuata ricavando il valore dei parametri di cella per due configurazioni omogenee ed una serie di configurazioni geometriche esatte ad una e due zone che comprendono tutte le possibili modellizzazioni del sistema riflettente lungo la direzione angolare del riflettore nel nocciolo. Si è inoltre effettuata un'analisi di sensitività sia su parametri operativi (temperatura sistema, temperatura riflettore, concentrazione di boro), sia su parametri di codice (ordine di convergenza dell'autovalore e delle autofunzioni, ordine di approssimazione P_n ed S_m , dimensione delle mesh computazionali, librerie di sezioni d'urto). Si è infine provveduto ad effettuare un calcolo in color-set su una zona angolare del riflettore per indagare l'influenza degli effetti 2-D sui parametri di cella. I risultati prodotti rappresentano un contributo migliorativo nella conoscenza dei parametri di cella di riflettore e potranno essere utilizzati per una più precisa valutazione del fenomeno del tilt nei sistemi GEN III+.

Abstract

In GEN III+ systems the correct modelization of the reflector zone is a key step for an exact prediction of the cell parameters whose values directly affect the radial power distribution of the core system. This need has become even more necessary after the discovery of the amplification of the “tilt power” phenomenon in the GEN III+ nuclear core. For this reason, special care is taken in the modelization methodology and in the generation of reflector homogenized cross-section and discontinuity factor (DFs) on the reflector zone. The deterministic package code used for the cell data calculation is T-NEWT of the SCALE 6.1.3 suite.

The strong difference in the neutronic properties at core/reflector interface combined with a high geometric heterogeneity between a core and a reflector system have suggested to perform a preliminary analysis on the GEN II reflector system as presented by NEA-NSC-DOC (2013) benchmark with the aim of testing the capability of the deterministic code to perform a correct calculation on a 1-D assembly/reflector modelization. The results, which are in good agreement with those evaluated with SERPENT 2.0 Monte Carlo code, confirmed the capability of SCALE 6.1.3 code to perform cell data reflector calculations.

The modelization analysis on the GEN III+ reflector system has been performed for two homogeneous configurations and for a series of one and two exact heterogeneous zones along the angular direction of the core/reflector system. It has been also realized a sensitivity analysis on operational (system temperature, reflector temperature and boron concentration) and code (eigenvalue and eigenfunction convergence, S_n and P_m order, computational mesh and cross sections libraries) parameters. Finally, it was performed a 2x2 color-set calculation to investigate the 2-D geometry effects on the numerical values of cell reflector parameters.

The final results are an improvement in the scientific knowledge of the reflector cell data values. These values can be used in a EPR nodal code calculation for a more accurate assessment of the core power distribution and of the “power tilt” values.

Introduzione

In questo lavoro di tesi vengono esposti i risultati dell'analisi condotta sul comportamento neutronico del riflettore posto sul dominio esterno di un nocciolo nucleare LWR. L'esistenza di un riflettore – collocato all'interno del vessel tra la zona attiva ed il barrel – produce sull'intero sistema nucleare tre benefici fondamentali :

1. Migliora l'economia neutronica del sistema;
2. Ottimizza la distribuzione radiale del flusso neutronico;
3. Riduce la fluenza neutronica al vessel.

In riferimento al primo punto, la capacità da parte del riflettore di migliorare l'economia neutronica del sistema è dovuta alla circostanza fisica che un riflettore, sorgente di neutroni termici (a causa del downscattering al suo interno della componente veloce del flusso), è in grado di generare una corrente neutronica netta diretta verso il nocciolo.

In riferimento al secondo punto, un riflettore, rispetto ad una configurazione nuda, determina un aumento del flusso neutronico all'interfaccia nocciolo/riflettore provocando, a parità di potenza espressa dalla zona attiva, un appiattimento complessivo della distribuzione radiale del flusso neutronico. Tale circostanza fisica è considerabile come un'ottimizzazione del flusso neutronico perché determina un bruciamento più omogeneo del combustibile all'interno del nocciolo con conseguente possibilità di realizzare condizioni di funzionamento più sicure, di spingersi a burn-up più elevati, e disporre di cicli operativi temporalmente più lunghi.

In riferimento al terzo punto, se si considera che il vessel rappresenta uno degli elementi non sostituibili durante la vita operativa di un impianto nucleare, la presenza del riflettore, interposto tra il nocciolo ed il vessel, permette di ridurre la fluenza neutronica al vessel (riducendo i DPA sul materiale) e conseguentemente di aumentare la vita operativa dell'intero sistema reattore.

Il progetto dei reattori PWR di ultima generazione (GENIII+) prevede all'esterno del nocciolo un nuovo sistema di riflessione rispetto ai reattori GEN II, ciò è dovuto alla necessità di risolvere una serie di problematiche che vengono brevemente discusse in questa sede.

I riflettori dei sistemi GEN II sono costituiti da un baffle d'acciaio sottile (~ 2.5 cm) seguito da una zona d'acqua (~ 20 cm) e presentano alcuni problemi di carattere neutronico. Infatti, a causa della presenza di un esiguo spessore d'acciaio, i neutroni veloci emessi dal nocciolo attraversano indenni il baffle per poi essere termalizzati e retroflessi dall'acqua ma, nel riattraversare il baffle in direzione del nocciolo, vengono catturati dalle forti risonanze in zona termica degli isotopi del ferro (effetto "trappola di flusso"). In sostanza il baffle d'acciaio sottile, essendo trasparente ai neutroni veloci e catturando quelli termici, risulta essere un pessimo riflettore neutronico.

I riflettori dei sistemi EPR-like (GEN III+) adottano, invece, un riflettore pesante in acciaio (~22-25 cm) che migliora sensibilmente gli obiettivi per i quali viene progettato un riflettore (punti 1-3 precedenti). Infatti, in riferimento al flusso neutronico veloce, per dimensioni dell'acciaio confrontabili con quelli del baffle (1-2 cm) l'assorbimento neutronico è preponderante rispetto allo scattering ma, all'aumentare dello spessore, l'importanza relativa dei due fenomeni s'inverte. Tale circostanza fisica comporta un aumento della frazione dei neutroni veloci ed epitermici riflessi nel nocciolo rispetto ad un riflettore GEN II. L'importanza neutronica di un neutrone riflesso sarebbe maggiore se il neutrone fosse completamente termalizzato, tuttavia l'enorme aumento di neutroni veloci ed epitermici riflessi verso il core nel riflettore pesante rispetto ad un riflettore standard, compensa ampiamente la loro scarsa importanza neutronica [1].

Il c.d. "riflettore pesante" analizzato è quello adottato dai reattori U.S. EPRTM progettati da AREVA. Esso è costituito d'acciaio e presenta al suo interno, in direzione assiale, una distribuzione di 832 fori di diametro pari a 1.3 cm. Tali fori, in condizioni operative, vengono attraversati dall'acqua ed hanno lo scopo di raffreddare il riflettore il quale, agendo da schermo, viene riscaldato per assorbimento da parte dell'acciaio della radiazione gamma e/o neutronica proveniente dal nocciolo. Il sistema è equipaggiato con un certo numero di orifizi che sono utilizzati per calibrare, attraverso un'opportuna resistenza, il flusso d'acqua entrante in ogni canale. Lo slab di fondo del riflettore ha al suo interno un plenum e agisce come una camera di distribuzione; una piccola porzione d'acqua che fluisce attraverso il nocciolo viene dirottata nel plenum attraverso dei fori d'ingresso posti al fondo del riflettore. Dal plenum, la maggior parte dell'acqua fluisce nei canali di raffreddamento, mentre una piccola percentuale fluisce nel gap tra il riflettore e la parete interna del barrel.

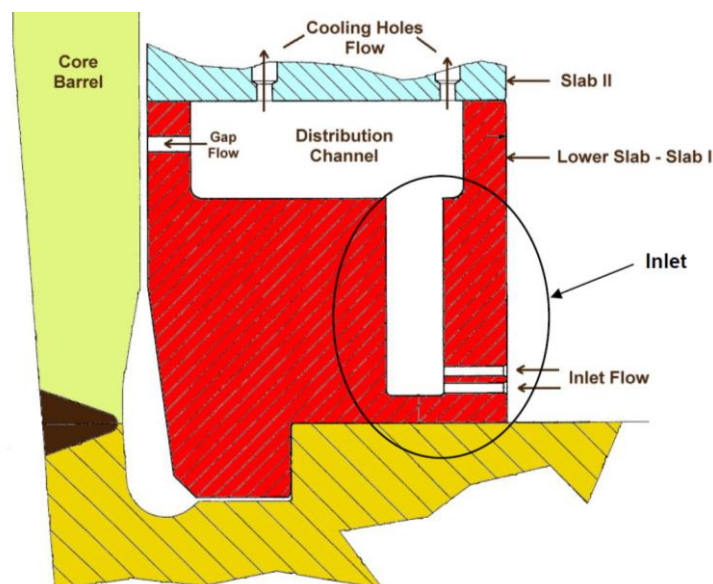


Figura 0.1: vista schematica dello slab inferiore di un riflettore pesante – EPRTM

Assialmente il riflettore pesante è un sistema costituito da un impilaggio di 12 slab di acciaio che vengono tenuti insieme da 8 "tie rod" e 8 "vertical keys". Le "tie rod" sono attraversate al loro interno da un flusso d'acqua che fornisce un sorgente di raffreddamento

addizionale per il sistema riflettente. Il flusso d'acqua delle "tie-rod" viene fornito attraverso canali dedicati che sono posti fuori il barrel e sono separati dal flusso che attraversa il riflettore. Tutti i flussi escono dall'alto del riflettore per poi unirsi alla corrente principale del nocciolo. Tra il diametro più esterno del riflettore ed il più interno del barrel vi è un piccolo gap detto regione anulare. Gli undici slab superiori, detti slab II-XII sono tutti identici con un'altezza pari a 417 mm ed un diametro pari a 4156 mm; lo slab superiore (XII) ha un diametro leggermente più grande pari a 4160 mm; lo slab XI ha, invece, un solco di 20 mm nel suo diametro interno. Gli slab II-X sono definiti slab tipici del sistema [2]. La Fig. 0.2 riporta la struttura generale ed una fase della realizzazione del riflettore pesante EPR.

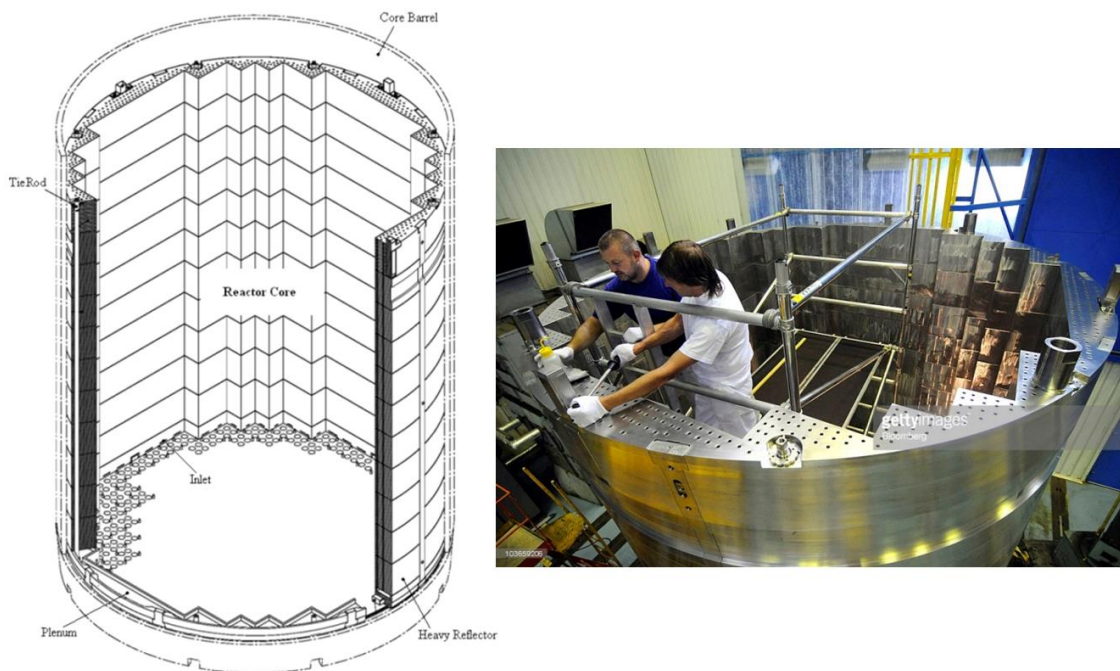


Figura 0.2: vista assonometrica e vista reale del riflettore EPR™

La necessità di effettuare uno studio dettagliato del comportamento neutronico dei riflettori pesanti (flussi, sezioni d'urto efficaci, adf) è dovuto sia a fenomeni di carattere fisico quali l'autoschermo delle risonanze degli isotopi catturatori dell'acciaio, sia ai fenomeni di Tilt che si instaurano nei sistemi PWR. In riferimento al secondo aspetto, di maggiore rilevanza ingegneristica, se ne propone una breve introduzione.

Il nocciolo nucleare è affetto da una problematica di disequilibrio azimutale della potenza nota come "*power Tilt*" per la quale, considerate due diverse zone del sistema che presentano teoricamente simmetria azimutale, il flusso neutronico esibisce invece un comportamento dissimmetrico che è tanto più pronunciato quanto più si è vicini alla periferia del core. Tale dissimmetria è stata verificata sperimentalmente, ma le cause che la producono non sono state ancora pienamente e completamente chiarite. Il Tilt provoca un effetto di dissimmetria sul flusso dell'ordine del 6% per sistemi PWR GEN II e può aumentare sino ad un valore di circa il 18-20% per sistemi PWR GEN III+ in condizioni BOC HZP. L'effetto della variazione del Tilt al variare della potenza nominale di un nocciolo PWR standard (CR) e con riflettore pesante (HR) viene proposto nella Fig. 0.3. [3].

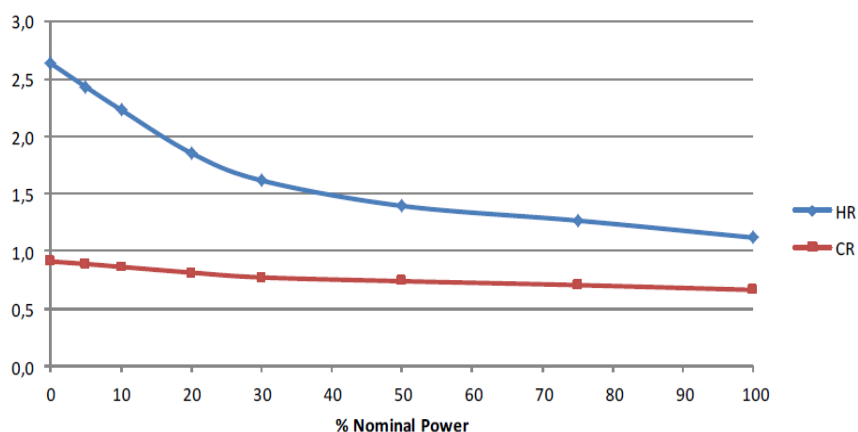


Figura 0.3: Tilt [%] vs potenza del reattore - combustibile a 0 BU

Nonostante gli effetti di feed-back termico del nocciolo riducano l'influenza del tipo di riflettore sul Tilt, si è analizzato che, anche in condizioni operative di piena potenza nominale, continua a persistere una differenza numerica tra sistemi GEN II ed i sistemi GEN III+. La variazione del valore di Tilt nelle due configurazioni CR ed HR è una diretta conseguenza del miglioramento, nei sistemi HR, della condizione espressa all'inizio di questo paragrafo (punto 2) per come mostrato nella Fig. 0.4 che evidenzia la distribuzione della potenza radiale lungo la diagonale di simmetria NW->SE del nocciolo per le condizioni operative di HZP e di HFP (100% della potenza nominale).

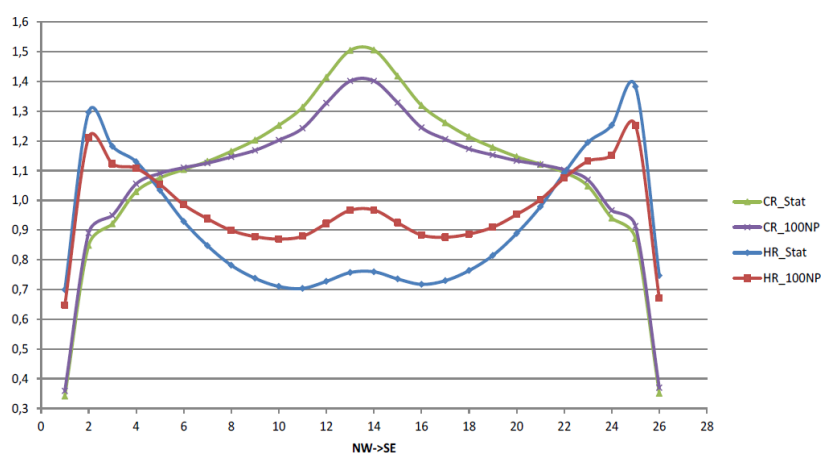


Figura 0.4: Tilt [%] vs diagonale NW->SE del nocciolo PWR

Nella Fig. 0.4 è anche evidente la dissimmetria del flusso particolarmente pronunciata nell'intorno del bordo esterno del nocciolo. Calcoli realizzati su un nocciolo PWR con riflettore convenzionale e pesante - diviso in 4 zone simmetriche da un asse di simmetria azimutale NW->SE - hanno evidenziato i seguenti valori di Tilt. [4].

Tabella 0.1: valore espresso dal Tilt in un nocciolo PWR diviso in 4 zone simmetriche

Valore del tilt con riflettore standard		Valore del tilt con riflettore pesante	
0.984	1.001	0.969	1.002
1.001	1.014	1.002	1.028
1.4 – 1.6 %		2.8 – 3.1 %	

La dissimmetria del flusso comporta proporzionalmente una dissimmetria del profilo radiale di potenza che risulta anch'esso essere amplificato nei sistemi GEN III+ (EPR-like). La figura seguente realizzata con il codice nodale CRONOS, propone in maniera evidente, in termini di mappa di potenza termica, le differenze tra un nocciolo EPR con riflettore standard ed un nocciolo EPR con riflettore pesante.

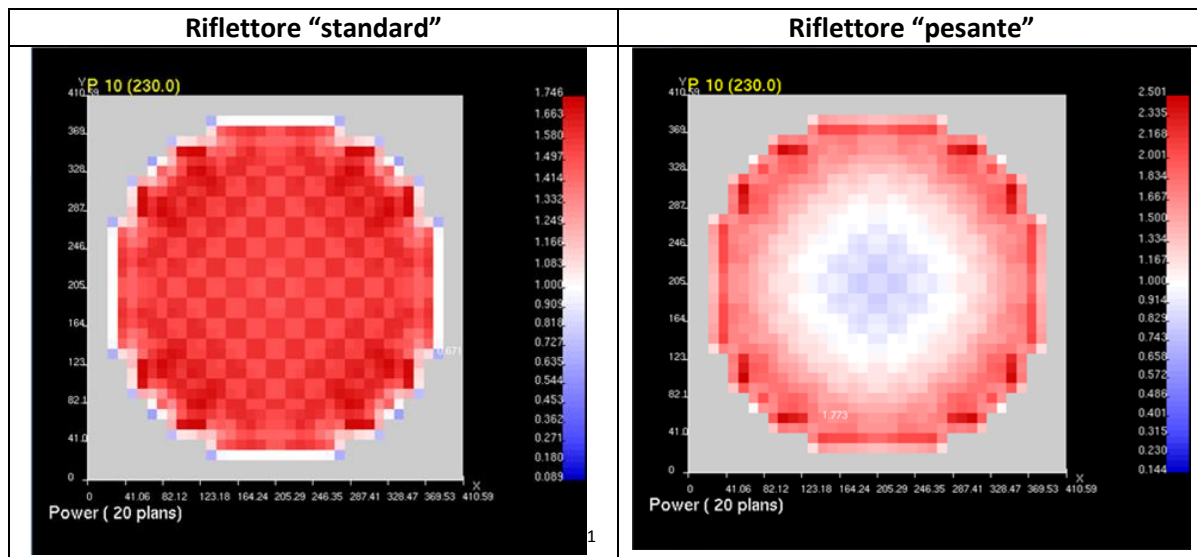


Figura 0.5: mappe di potenza termica EPR

L'amplificazione del Tilt di un fattore 3 nella zone periferiche del nocciolo dei sistemi GEN III+ porta a considerare come obiettivo prioritario - per poter effettuare corretti calcoli di nocciolo con i codici nodali in diffusione - poter disporre di accurati parametri di cella della zona di riflessione.

Il lavoro di tesi di dottorato si è allora posto come obiettivo ultimo, attraverso un'indagine sulla migliore modellizzazione possibile di un riflettore EPR, la determinazione dei valori numerici delle sezioni d'urto efficaci omogenee e condensate a due gruppi. Nella letteratura scientifica di riferimento non sono presenti, al momento della realizzazione di questo lavoro, calcoli di Xs efficaci di riflettore pesante per sistemi GEN III+.

La tesi prevede un primo capitolo che presenta una breve trattazione teorica riguardante la generazione dei coefficienti di discontinuità denominati ADF (Assembly Discontinuity Factor) necessari per realizzare calcoli di nocciolo che presentino continuità all'interfaccia tra sistemi tra loro fisicamente diversi quali risultano essere l'assembly ed il riflettore. Il capitolo termina con una breve trattazione dei modelli creati, nel corso dello sviluppo storico dei codici di neutronica, per la determinazione di sistemi equivalenti a quello del riflettore (Metodo di Reuss-Nisan e metodo Mondot o BETA).

Il secondo capitolo presenta gli strumenti di calcolo e i dati nucleari utilizzati; il capitolo si sofferma ad analizzare con dettaglio i codici computazionali utilizzati per effettuare il calcolo.

¹ Fig. 0.5, Ing. Federico Rocchi, comunicazione personale, dati di fonte ENEA-UTFISSM-PRONOC, 2015.

In particolare, l'accento è posto sul codice SCALE 6.1.3 - codice di riferimento - con particolare attenzione alla sequenza utilizzata nel calcolo (t-newt) posta all'interno del codice di controllo TRITON. Il capitolo espone la scelta dei metodi di processamento utilizzati per effettuare l'autoschermo (CENTRM) e il significato ed il ruolo di tutti i moduli di calcolo che vengono invocati dal codice per la realizzazione sia del calcolo di autoschermo che di quello di trasporto. La presenza di specifici diagrammi di flusso rende comprensibile il funzionamento del modulo di processamento e dell'intera sequenza di calcolo. Una seconda sezione riporta il codice statistico SERPENT 2.0 utilizzato per realizzare i calcoli di confronto; tale sezione presenta le potenzialità e gli attuali limiti del codice Monte Carlo utilizzato per come si sono rivelati nei successivi calcoli di sistemi assembly-riflettore.

Il terzo capitolo presenta la realizzazione di calcoli di sezioni d'urto efficaci per un reattore sperimentale di ricerca quale il reattore RB3 di Montecuccolino che svolse le sue attività di ricerca e didattica sino al 1989. La scelta di realizzare un calcolo su tale tipologia di reattore è stata dettata dalla volontà di testare la capacità del codice di riferimento (SCALE 6.1.3) – ottimizzato per eseguire simulazioni su sistemi commerciali – di realizzare calcoli in sistemi non convenzionali. In particolare, il sistema RB3 presenta una serie di difficoltà rispetto ai sistemi commerciali quali: sistema riflesso computazionalmente oneroso; calcolo di autoschermo non standard la cui cella elementare non è immediatamente modellizzabile con i moduli disponibili in Scale; sistema fortemente sovramoderato ed ad acqua pesante; presenza di un notevole riflettore in grafite (con problematiche di autoschermo); estensione del calcolo sino allo schermo biologico (2 metri). I risultati ottenuti mostrano la capacità di SCALE 6.1.3 di realizzare calcoli di trasporto anche per sistemi complessi.

Il quarto capitolo riporta l'analisi del sistema assembly-riflettore PWR TMI-1 come definito nel Benchmark NEA/NSC/DOC/(2013)7 sull'analisi dell'incertezza nei sistemi nucleari. Tale benchmark è ancora in corso di realizzazione e, in una delle tre sezioni in cui è suddiviso, rappresenta un importante punto d'incontro internazionale per la verifica dei risultati prodotti dai codici nucleari. Nel capitolo vengono riportati i risultati ottenuti nel calcolo delle sezioni d'urto efficaci realizzate sia col codice SCALE 6.1.3 che col codice SERPENT 2.0. In particolare si analizza sia una configurazione geometrica eterogenea (assembly, shroud, acqua) che una omogenea (assembly, riflettore) facendo il confronto con risultati da letteratura ottenuti con altri codici di calcolo (DRAGON, MCNP). Si è altresì verificata l'influenza della concentrazione di boro sul valore della Sezione d'urto d'assorbimento. L'esperienza condotta ha mostrato la validità dell'utilizzo di SCALE come codice di riferimento e la necessità di una modellizzazione esatta della zona geometrica del riflettore. Nel capitolo si è anche realizzato un calcolo neutronico preliminare in riferimento al solo assembly PWR 15x15 utilizzando il codice MCNPX 2.7.0, il codice SERPENT 2.0 ed il codice SCALE 6.1.3. I risultati trovati sono stati confrontati con quelli – unici al momento disponibili – del benchmark NEA/NSC/DOC/(2013)7 rilevando un buon accordo col valore medio delle sezioni d'urto di riflettore di benchmark a meno di escludere alcuni risultati, provenienti da enti di ricerca stranieri, che si sono rivelati grossolanamente errati. I risultati

ottenuti sono stati presentati alla 23^a conferenza internazionale sull'Energia Nucleare per la Nuova Europa (NENE2014).

Il quinto capitolo riporta una disamina di alcuni dei modelli dei sistemi di assembly+riflettore (EPRI, VENUS, RISOM, BEARS) utilizzati nel corso di un recente passato per effettuare calcoli di sezioni d'urto efficaci. Per tali modelli, sono state realizzate le simulazioni con SCALE 6.1.3 e ne sono stati ricavati i risultati numerici. Dove possibile, i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli disponibili.

Il sesto capitolo riporta le analisi condotte sul sistema assembly+riflettore EPR. In particolare sono stati effettuati dei confronti tra un riflettore standard ed uno pesante, sono stati ricavati i valori delle sezioni d'urto efficaci per una configurazione omogeneizzata a tre zone ("Sanchez model"), per una configurazione esatta in zona di mezzeria e per una serie di configurazioni esatte lungo la direzione azimutale del riflettore. Si è altresì verificato l'effetto di una diversa distribuzione di temperatura nel riflettore e sono state effettuate delle analisi di sensitività sull'utilizzo di diverse librerie (v5-44, v5-238, v6-238, v7-238), sulle configurazioni operative (HFP e HZP), sulla presenza di uno o due assembly collegati al riflettore, sulla concentrazione di boro (0-1300 ppm), e sull'influenza della diversa discretizzazione delle mesh computazionali sul risultato finale. E' stato inoltre condotto uno studio sull'effetto della variazione della percentuale di acciaio in un sistema omogeneizzato (H₂O+SS304s). Il valore delle sezioni d'urto di riflettore pesante ottenute con SCALE 6.1.3 sono state inoltre confrontate con quelle ottenute col codice Monte Carlo Serpente 2.0. Per una serie significativa dei casi descritti precedentemente si sono realizzate le mappe di flusso termico e veloce ed i profili di flusso nella zona di mezzeria del sistema.

Capitolo 1 – Aspetti teorici

1.1 Introduzione

In questo capitolo si riporta una breve trattazione teorica dei metodi di determinazione dei fattori di discontinuità (Assembly Discontinuity Factors, ADF) e dei modelli di rappresentazione del riflettore storicamente utilizzati nei calcoli di cella. In appendice, viene altresì riportata una sintesi della teoria della diffusione per i sistemi nocciolo/riflettore secondo la trattazione proposta dal testo “Nuclear Reactor Theory” di J. R. Lamarsh.

1.2 Assembly Discontinuity Factors (ADF) per sistemi assembly-riflettore

La maggior parte dei codici computazionali – incluso il codice di riferimento SCALE 6.1.3 – ottengono le sezioni d’urto di riflettore effettive omogeneizzate resolvendo problemi in geometria monodimensionale (1-D) come quello mostrato in Fig. 1.1.

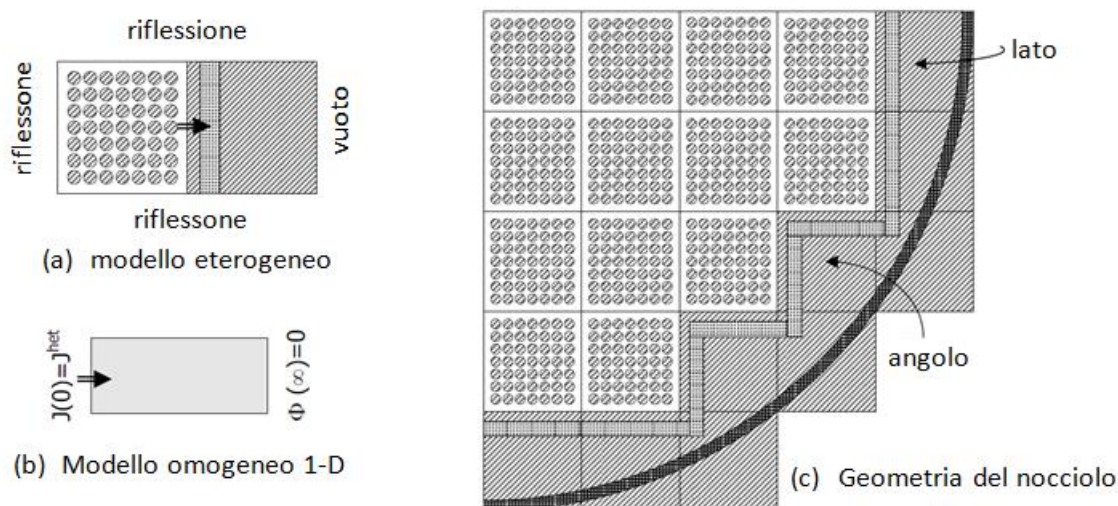


Figura 1.1: Modelli di Riflettore – PWR

Le sezioni d’urto omogenee efficaci sono generate utilizzando un modello eterogeneo 1-D di riflettore. Per quanto riguarda gli ADF - definiti secondo quanto riportato nel capitolo 2 come il rapporto tra il flusso neutronico medio eterogeneo in trasporto e quello omogeneo in diffusione sulla superficie d’interfaccia - poiché in molti codici di cella i flussi medi di superficie del riflettore omogeneo non sono forniti esplicitamente, si utilizza un metodo alternativo per determinare i fattori di discontinuità degli assembly. I flussi medi di superficie del riflettore omogeneo sono determinati resolvendo l’equazione di diffusione 1-D nella regione omogenea del riflettore. Nel riflettore omogeneo, le equazioni di diffusione multigruppo sono date da:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = D^{-1} M \phi \quad (1.1)$$

dove

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_g \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} \Sigma_{r1} & -\Sigma_{12} & \dots & -\Sigma_{1g} \\ -\Sigma_{21} & \Sigma_{r2} & \dots & -\Sigma_{2g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\Sigma_{g1} & -\Sigma_{g2} & \dots & \Sigma_{rg} \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & D_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & D_g \end{bmatrix}$$

con

$$\Sigma_{ri} = \Sigma_{ai} - \Sigma_{ii} + \sum_{j=1}^g \Sigma_{ji}$$

definendo una matrice A come il prodotto dell'inversa della matrice D e della matrice M:

$$A = D^{-1} M = \begin{bmatrix} D_1^{-1} \Sigma_{r1} & -D_1^{-1} \Sigma_{12} & \dots & -D_1^{-1} \Sigma_{1g} \\ -D_2^{-1} \Sigma_{21} & D_2^{-1} \Sigma_{r2} & \dots & -D_2^{-1} \Sigma_{2g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -D_g^{-1} \Sigma_{g1} & -D_g^{-1} \Sigma_{g2} & \dots & D_g^{-1} \Sigma_{rg} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Assumendo che A sia una matrice positiva definita e diagonalizzabile, allora esiste la matrice inversa V tale che:

$$V^{-1} A V = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_g \end{bmatrix} = B^2 = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & B_g \end{bmatrix}^2 \quad (1.3)$$

dove $B_i = \sqrt{\lambda_i}$. Sostituendo le matrici sopra definite nell'equazione alla diffusione multigruppo si ha:

$$\frac{\partial^2 V^{-1} \phi}{\partial x^2} = V^{-1} A V V^{-1} \phi = \Lambda V^{-1} \phi \quad (1.4)$$

L'equazione differenziale (1.4) ha la seguente soluzione analitica formale:

$$V^{-1} \phi = e^{-Bx} C + e^{Bx} F \quad (1.5)$$

Le costanti C ed F possono essere determinate dalle condizioni al contorno del sistema riflettore per come segue:

$$C.C.1: \quad \phi(\infty) = 0 \quad F = 0$$

$$C.C.2: \quad J(0) = -D \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad C = (DVB)^{-1} J(0)$$

La soluzione analitica del flusso assume quindi la seguente formulazione:

$$\phi(x) = V e^{-Bx} (DVB)^{-1} J(0) \quad (1.6)$$

ed il flusso omogeneo alla superficie sinistra diventa quindi calcolabile come:

$$\phi(0) = V (DVB)^{-1} J(0) \quad (1.7)$$

Quindi, il fattore di discontinuità di assembly per il sistema con riflettore può essere valutato come segue:

$$ADF_k = \frac{\phi_k^{het}(0)}{\phi_k(0)}; \quad \text{con } k = 1, 2, \dots, g \quad (1.8)$$

Algoritmo efficiente per il calcolo della matrice A

Nel riflettore non vi è materiale fissile, quindi la matrice A si presenterà in forma triangolare inferiore:

$$A = \begin{bmatrix} A_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n,1} & A_{n,2} & \dots & A_{n,n} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Un algoritmo efficiente evita di valutare tutti gli autovettori della matrice A. Se si considerano le condizioni al contorno destro $\phi(\infty) = 0$, la soluzione analitica può essere espressa come:

$$\phi_k = \sum_{i=1}^k F_{k,i} V_i e^{-B_i x} C_i \quad (1.10)$$

con $F_{i,i}$ matrice unitaria dello stesso ordine di A. Sostituendo la (1.10) nella (1.1) si ha:

$$\begin{aligned} A\phi &= \sum_{i=1}^k (F_{k,i} V_i B_i^2 e^{-B_i x} C_i) = \sum_{i=1}^k (F_{k,i} A_{i,i} V_i e^{-B_i x} C_i) = \sum_{i=1}^{k-1} \left(A_{k,i} \sum_{j=1}^i (F_{i,j} V_j e^{-B_j x} C_j) \right) = \\ &= \sum_{j=1}^k \left((F_{k,j} A_{j,j} - A_{k,k} F_{k,j}) V_j e^{-B_j x} C_j \right) = \sum_{i=1}^{k-1} \left(A_{k,i} \sum_{j=1}^i (F_{i,j} V_j e^{-B_j x} C_j) \right) \\ &= \sum_{j=1}^{k-1} \left(\sum_{i=j}^{k-1} (A_{k,i} F_{i,j}) V_j e^{-B_j x} C_j \right) \end{aligned}$$

Per $1 \leq j \leq k$:

$$F_{k,i}A_{i,i} - A_{k,k}F_{k,j} = \sum_{i=j}^{k-1} A_{k,i}F_{i,j} \quad (1.11)$$

Gli elementi della matrice $F_{k,j}$ possono essere risolti dalla (1.11) che è un sistema di $l_k x l_i$ equazione lineari.

Utilizzando la condizione al contorno sinistra:

$$D_k^{-1}J_k(0) = -\frac{\partial \phi_k}{\partial x} = \sum_{i=1}^k F_{k,i}V_iB_iC_i \quad (1.12)$$

$$C_k = (V_kB_k)^{-1} \left(D_k^{-1}J_k(0) - \sum_{i=1}^{k-1} F_{k,i}V_iB_iC_i \right) \quad (1.13)$$

Tutti i coefficienti nella soluzione del flusso (1.10) possono essere valutati in maniera sequenziale. Con tale metodo sono necessari gli autovettori del blocco diagonale invece che gli autovettori della matrice A. Gli autovettori del blocco diagonale, che normalmente ha un ordine minore, sono molto più facili da valutare.

Se non vi è up-scattering la matrice A diviene una matrice triangolare inferiore. Tutti i blocchi sono di dimensione 1x1 e l'algoritmo diviene ancora più semplice:

$$\phi_k = \sum_{i=1}^k F_{k,i}e^{-B_i k} \quad (1.14)$$

$$B_k = \sqrt{A_{k,k}} \quad (1.15)$$

$$F_{k,k} = (A_{j,j} - A_{k,k})^{-1} \sum_{i=j}^{k-1} A_{k,i}F_{i,j} \quad (1.16)$$

Tipicamente, quattro tipologie diverse di sezioni d'urto di riflettore sono richieste per un calcolo di nocciolo tridimensionale: top, bottom, laterale e ad angolo. Le strutture di riflessione del top e del bottom del nocciolo possono essere differenti ed avere, quindi, differenti sezioni d'urto. In ogni modo, la modellizzazione radiale del riflettore può essere solitamente utilizzata per generare le sezioni d'urto di riflettore poiché tipicamente c'è una piccola differenza tra le rispettive sezioni d'urto che hanno un influenza minima sul comportamento neutronico nella regione assiale del riflettore. Il modello di riflettore della Fig. 1.1 è normalmente adeguato per generare le sezioni d'urto di riflettore per il riflettore laterale. In ogni modo, solitamente si risolve l'equazione di diffusione 2-D per la regione ad angolo e si è visto che le sezioni d'urto ad angolo possono essere ben rappresentate correggendo le sezioni d'urto di scattering. Quindi, le sezioni d'urto per gli angoli del

riflettore possono essere ottenute modificando le sezioni d'urto di scattering con un fattore di correzione;

$$r_{2D} = \frac{P_{FA} - d}{P_{FA}} \quad (1.17)$$

dove P_{FA} e d denotano, rispettivamente, il passo dell'assembly di combustibile e lo spessore dello shroud.

1.3 Modelli di rappresentazione dei riflettori

Attualmente esistono essenzialmente due modelli di rappresentazione del riflettore che permettono di simulare l'effetto sull'assemblaggio di combustibile e di valutare il flusso neutronico nel nocciolo. Tali modelli vengono utilizzati nei seguenti due metodi di calcolo:

1. *Metodo del riflettore equivalente*: viene effettuato un calcolo di trasporto sostituendo al riflettore eterogeneo una rappresentazione con un mezzo omogeneo detto riflettore equivalente. I metodi che utilizzano una simile rappresentazione è il metodo di Reuss-Nissan (1976);
2. *Metodo di albedo*: nel calcolo di trasporto il riflettore viene sostituito con una condizione limite di albedo che riproduce, all'interfaccia nocciolo/riflettore, lo scambio neutronico. Il metodo di Mondot o metodo BETA (1983) utilizza una tale rappresentazione;

Nei paragrafi seguenti verranno presentati i metodi del riflettore equivalente ed il metodo di albedo.

1.3.1 Metodo di Reuss-Nissan

Tale metodo consiste di cinque passi calcolativi:

- Calcolo in trasporto di un assembly di combustibile in mezzo infinito a due dimensioni. I parametri neutronici generati nel calcolo verranno utilizzati nel calcolo di nocciolo in diffusione. Essi rappresenteranno gli assembly di combustibile.
- Determinazione dei coefficienti di diffusione del riflettore per un calcolo in un mezzo omogeneo infinito corrispondente al riflettore;
- Calcolo di trasporto in 1-D in una direzione (nocciolo + riflettore). Il nocciolo viene modellizzato con un mezzo omogeneo infinito corrispondente ad un assembly di combustibile. In tal modo, vengono determinate le sezioni d'urto efficaci macroscopiche del riflettore;

- Per sostituire il riflettore reale con uno equivalente, si esegue un calcolo d'equivalenza diffusione-diffusione;
- Si incorporano i parametri neutronici calcolati precedentemente nel calcolo del nocciolo.



Figura 1.2 : Geometria nel calcolo in diffusione secondo il metodo di Reuss-Nissan

Il metodo, da un calcolo di nocciolo utilizzando la geometria in Fig. 1.2, conduce a risultati soddisfacenti per quanto riguarda la distribuzione di potenza degli assembly di combustibile fatta eccezione degli assemblaggi periferici la cui potenza risulta essere sottostimata. Un altro inconveniente è che non considera gli aspetti geometrici del riflettore che richiederebbero una modellizzazione 2-D.

1.3.2 Metodo di Mondot (BETA)

Il metodo stabilisce un'equivalenza tra due calcoli differenti l'uno deterministico e l'altro stocastico. All'interfaccia nocciolo/riflettore si utilizza la matrice d'albedo ottenuta in un calcolo di riferimento in un riflettore semi-infinito omogeneo equivalente. Un tale calcolo è stato eseguito con un'approssimazione P_1 . Utilizzando la definizione di albedo e scrivendo le equazioni di condizione ai limiti dell'equazione di diffusione in forma matriciale, la risoluzione dell'equazione di diffusione multigruppo assume la seguente relazione:

$$[\Sigma] = [\gamma][D]^{-1}[\gamma] \quad (1.18)$$

in cui

$$[\gamma] = \frac{1}{2}[1 + \beta]^{-1}[1 - \beta] \quad (1.19)$$

dove:

- β : matrice d'albedo;
- D : una matrice diagonale i cui elementi forniscono equazioni del tipo:

$$k_g D_g = \frac{1}{2} \frac{(1 - \beta_{gg})}{(2 + \beta_{gg})} \quad k_g^2 = \frac{\Sigma_g}{D_g} \quad (1.20)$$

- $[\Sigma]$, $[\gamma]$: due matrici triangolari.

L'equazione (1.20) permette di scrivere gli albedo in funzione dei parametri neutronici secondo la seguente equazione:

$$\beta_{gg} = \frac{1 - 2k_g D_g}{1 + 2k_g D_g} \quad (1.21)$$

La relazione precedente mostra l'equivalenza tra la matrice di albedo e le costanti neutroniche di riflettore equivalente. L'inconveniente di tal metodo risiede nel fatto che tali costanti sono calcolate con una matrice di albedo su un mezzo infinito che non considerano i diversi effetti del riflettore sulle celle o sull'assemblaggio del combustibile periferico.

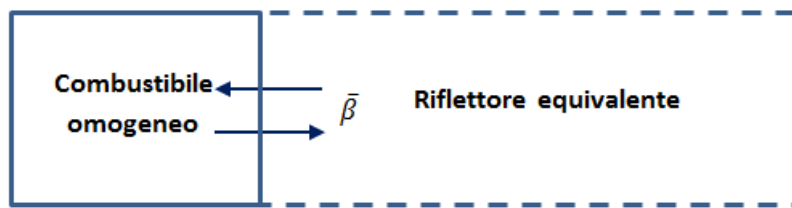


Figura 1.3: Geometria utilizzata in diffusione secondo il metodo di Mondot

Capitolo 2 – Strumenti di calcolo e dati nucleari

2.1 Introduzione

La realizzazione dei calcoli per la determinazione delle librerie di sezioni d'urto macroscopiche condensate a pochi gruppi ed omogeneizzate nelle diverse regioni della zona di riflessione di un reattore LWR è stata effettuata attraverso l'utilizzo di due strumenti di calcolo:

- 1) la sequenza di codici deterministici inseriti nel modulo funzionale T-NEWT presente nel modulo di controllo TRITON nella suite del sistema integrato di codici SCALE 6.1.3;
- 2) il codice statistico Monte Carlo "stand-alone" SERPENT 2.0.

La scelta di strumenti di calcolo che utilizzano un diverso approccio metodologico, deterministico e stocastico, per la risoluzione dell'equazione del trasporto ha permesso – attraverso un confronto del risultato numerico ottenibile da entrambi i codici – la validazione dei risultati raggiunti permettendo, quindi, una verifica della correttezza numerica dei risultati stessi. Nei successivi paragrafi questi codici verranno descritti nel dettaglio con particolare riferimento alle metodiche di risoluzione ed alle opzioni di calcolo utilizzate.

2.2 T-NEWT

La sequenza T-NEWT – invocabile attraverso il modulo di controllo TRITON (Transport Rigor Implemented with Time-dependent Operation for Neutronic depletion) – ha permesso la determinazione delle librerie di sezioni d'urto efficaci macroscopiche attraverso l'esecuzione seriale di due calcoli: l'autoschermo ed il trasporto. T-NEWT può eseguire il calcolo invocando alternativamente tre sequenze di moduli funzionali (BONAMI, NITWAL e CENTRM) che differiscono tra di loro per la modalità di processamento delle sezioni d'urto. Nella Tab. 3.1 viene riportato l'elenco delle sequenze funzionali e dei moduli utilizzabili in T-NEWT per la realizzazione dell'autoschermo delle sezioni d'urto ed i calcoli di trasporto neutronico.

Tabella 2.1: Sequenze funzionali e moduli presenti nella sequenza di calcolo T-NEWT

Sequenza di calcolo	Sequenza Funzionale	Moduli Invocati		Obiettivo Sequenza
		Autoschermo	Trasporto	
T-NEWT	Centrm ¹	Crawdad, Bonami, Worker, Centrm, PMC, Cajun, Chops, Malocs.	Newt	Calcolo di trasporto 2-D alle ordinate discrete con librerie di sezioni d'urto multigruppo problema - dipendente.
	Nitawl ²	Bonami, Nitawl, Malocs.	Newt	
	Bonami ³	Bonami, Worker, Malocs, Newt.	Newt	

¹ Schema predefinito per il processamento delle risonanze nella sequenza di calcolo T-NEWT;

² Schema di calcolo disponibile per i soli dati di sezioni d'urto ENDF/B-V;

³ Schema di calcolo disponibile per i soli dati di sezioni d'urto ENDF/B-VI ed ENDF/B-VII.

La Fig. 2.3 mostra la rappresentazione grafica dell'andamento dello spettro neutronico.

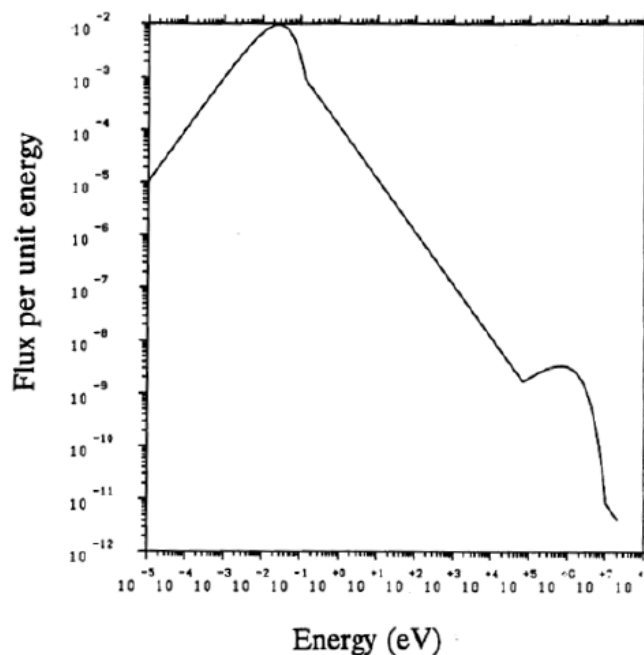


Figura 2.3: Spettro di fissione utilizzato in tutte le librerie ENDF presenti in SCALE 6.1.3

V5-238

La libreria ENDF/B-V è una libreria di analisi di criticità nota anche come LAW (Library to Analyze radioactive Waste). Essa contiene i dati per tutti i nuclidi (>300) disponibili nella ENDF/B-V a 238 gruppi processati dal sistema AMPX-77. La libreria è suddivisa in 148 gruppi veloci e 90 gruppi termici (sotto i 3 eV) e, per alcuni nuclidi (^{14}N , ^{15}N , ^{16}O , ^{155}Eu) dispone anche di dati valutati nella libreria di sezioni d'urto ENDF/B-VI. La maggior parte dei nuclidi che presentano delle risonanze hanno dati di risonanza nella regione delle risonanze risolte (da processare con NITAWL) e fattori di Bondarenko (da processare con BONAMI) nella regione delle risonanze non risolte.

Tutti i nuclidi utilizzano un'espansione dei polinomio di Legendre di tipo P_5 per rappresentare i processi di scattering elastico ed inelastico discreto nell'intervallo energetico veloce; con tale approssimazione le librerie sono adatte sia per applicazioni reattoristiche che di schermaggio. Una rappresentazione P_3 viene utilizzata per lo scattering termico, mentre tutti gli altri processi di scattering utilizzano una rappresentazione P_0 .

La libreria include anche una serie di spettri neutronici di seguito elencati:

1. Uno spettro basato su una cella di combustibile di un assembly LWR Westinghouse 17x17;
2. Uno spettro progettato per l'utilizzo sui tank di immagazzinamento del combustibile nell'esperimento sui Reattori a Sali Fusi (MSRE) ad ORNL;
3. Uno spettro mediato in uno schermo d'acciaio al carbonio di 27 cm per l'utilizzo negli studi di schermaggio;

4. Due spettri medi localizzati in un schermo costituito da 18.6 di Piombo e 13 cm di resina per l'utilizzo negli studi sullo schermaggio dei cask di trasporto del combustibile;
5. Uno spettro mediato in uno schermo di calcestruzzo spesso 50 cm per studi sullo schermaggio dei cask di trasporto del combustibile;
6. Uno spettro in un mezzo infinito di idrogeno ed ^{235}U con un rapporto $H/X=300$.

Nei casi che vanno da 3 a 6 la sorgente di combustibile esausto è un assembly Westinghouse 17x17 con un arricchimento iniziale pari al 3.0 wt % bruciato sino a 30 GWD/MTU e raffreddato per 5 anni.

La validazione di queste sezioni d'urto è stata realizzata mediante l'esecuzione di 33 benchmarks. I risultati ottenuti sono simili a quelli presentati in altre analisi di valutazione di dati che utilizzavano differenti librerie di sezioni d'urto basate sulle ENDF/B-V. Un notevole miglioramento nell'andamento del keff con il leakage si è riscontrato con l'utilizzo della valutazione dell'ossigeno fatta con le ENDF/B-VI. La libreria LAW sembra comunque essere accettabile per eseguire analisi di criticità e applicazioni di fisica del reattore.

ENDF/B-V a 44 gruppi

La libreria ENDF/B-V a 44 gruppi, versione collassata della libreria v5-238, è stata progettata per l'analisi di combustibili freschi ed esausti in reattori LWR e contiene tutti i nuclidi (>300) presenti nella ENDF/B-V. Il limite dell'intervallo dei gruppi energetici utilizzati come sottoinsiemi di quelli a 238 gruppi è stato scelto in modo da enfatizzare i fondamentali aspetti spettrali di un tipico combustibile LWR. In particolare, la struttura a gruppi è stata progettata per soddisfare le seguenti caratteristiche: due intervalli nello spettro delle sezioni d'urto dell'ossigeno, uno nella sezione d'urto del ferro, il picco Maxwelliano nel range termico, e la risonanza a 0.3 eV del ^{239}Pu . Il risultato globale è la suddivisione della libreria in 22 gruppi energetici veloci e 22 gruppi energetici termici. La struttura a gruppi fine delle sezioni d'urto v5-238 è stata collassata a 44 gruppi utilizzando lo spettro della celle di combustibile calcolata su un assembly Westinghouse 17x17 PWR. La Tab.2 riporta la suddivisione in intervalli energetici delle librerie a 238 e a 44 gruppi.

Tabella 2.2: Suddivisione degli intervalli energetici in 238 e 44 gruppi nelle librerie di SCALE 6.3.1

238 grup- pi	44 grup- pi	Energia Superio- re (eV)	238 grup- pi	44 grup- pi	Energia Superio- re (eV)	238 grup- pi	44 grup- pi	Energia Superio- re (eV)	238 grup- pi	44 grup- pi	Energia Superio- re (eV)	238 grup- pi	44 grup- pi	Energia Superio- re (eV)
1	1	2.00E+07	49		7.30E+04	97		5.20E+01	145		3.73E+00	193		9.25E-01
2		1.73E+07	50		6.00E+04	98		5.06E+01	146		3.50E+00	194		9.00E-01
3		1.57E+07	51		5.20E+04	99		4.92E+01	147		3.15E+00	195		8.50E-01
4		1.46E+07	52		5.00E+04	100		4.83E+01	148		3.05E+00	196		8.00E-01
5		1.38E+07	53		4.50E+04	101		4.70E+01	149	23	3.00E+00	197		7.50E-01
6		1.28E+07	54		3.00E+04	102		4.52E+01	150		2.97E+00	198		7.00E-01
7		1.00E+07	55	13	2.50E+04	103		4.40E+01	151		2.87E+00	199		6.50E-01
8	2	8.19E+06	56	14	1.70E+04	104		4.24E+01	152		2.77E+00	200	26	6.25E-01
9	3	6.43E+06	57		1.30E+04	105		4.10E+01	153		2.67E+00	201		6.00E-01

10	4	4.80E+06	58	9.50E+03	106	3.96E+01	154	2.57E+00	202	5.50E-01
11		4.30E+06	59	8.03E+03	107	3.91E+01	155	2.47E+00	203	5.00E-01
12	5	3.00E+06	60	6.00E+03	108	3.80E+01	156	2.38E+00	204	4.50E-01
13	6	2.48E+06	61	3.90E+03	109	3.70E+01	157	2.30E+00	205	27 4.00E-01
14	7	2.35E+06	62	3.74E+03	110	3.55E+01	158	2.21E+00	206	28 3.75E-01
15	8	1.85E+06	63	15 3.00E+03	111	3.46E+01	159	2.12E+00	207	29 3.50E-01
16		1.50E+06	64	2.58E+03	112	3.38E+01	160	2.00E+00	208	30 3.25E-01
17	9	1.40E+06	65	2.29E+03	113	3.33E+01	161	1.94E+00	209	3.00E-01
18		1.36E+06	66	2.20E+03	114	3.18E+01	162	1.86E+00	210	31 2.75E-01
19		1.32E+06	67	1.80E+03	115	3.13E+01	163	1.77E+00	211	32 2.50E-01
20		1.25E+06	68	1.55E+03	116	18 3.00E+01	164	1.68E+00	212	33 2.25E-01
21		1.20E+06	69	1.50E+03	117	2.75E+01	165	1.59E+00	213	34 2.00E-01
22		1.10E+06	70	1.15E+03	118	2.50E+01	166	1.50E+00	214	1.75E-01
23		1.01E+06	71	9.50E+02	119	2.25E+01	167	1.45E+00	215	35 1.50E-01
24		9.20E+05	72	6.83E+02	120	2.10E+01	168	1.40E+00	216	1.25E-01
25	10	9.00E+05	73	6.70E+02	121	2.00E+01	169	1.35E+00	217	36 1.00E-01
26		8.75E+05	74	16 5.50E+02	122	1.90E+01	170	1.30E+00	218	9.00E-02
27		8.61E+05	75	3.05E+02	123	1.85E+01	171	1.25E+00	219	8.00E-02
28		8.20E+05	76	2.85E+02	124	1.70E+01	172	1.23E+00	220	37 7.00E-02
29		7.50E+05	77	2.40E+02	125	1.60E+01	173	1.20E+00	221	6.00E-02
30		6.79E+05	78	2.10E+02	126	1.51E+01	174	1.18E+00	222	38 5.00E-02
31		6.70E+05	79	2.08E+02	127	1.44E+01	175	1.15E+00	223	39 4.00E-02
32		6.00E+05	80	1.93E+02	128	1.38E+01	176	1.14E+00	224	40 3.00E-02
33		5.73E+05	81	1.86E+02	129	1.29E+01	177	1.13E+00	225	41 2.53E-02
34		5.50E+05	82	1.22E+02	130	1.19E+01	178	1.12E+00	226	42 1.00E-02
35		5.00E+05	83	1.19E+02	131	1.15E+01	179	1.11E+00	227	43 7.50E-03
36		4.70E+05	84	1.15E+02	132	19 1.00E+01	180	1.10E+00	228	5.00E-03
37		4.40E+05	85	1.08E+02	133	9.10E+00	181	1.09E+00	229	4.00E-03
38		4.20E+05	86	17 1.00E+02	134	20 8.10E+00	182	1.08E+00	230	44 3.00E-03
39	11	4.00E+05	87	9.00E+01	135	7.15E+00	183	1.07E+00	231	2.50E-03
40		3.30E+05	88	8.20E+01	136	7.00E+00	184	1.06E+00	232	2.00E-03
41		2.70E+05	89	8.00E+01	137	6.75E+00	185	1.05E+00	233	1.50E-03
42		2.00E+05	90	7.60E+01	138	6.50E+00	186	1.04E+00	234	1.20E-03
43		1.50E+05	91	7.20E+01	139	6.25E+00	187	1.03E+00	235	1.00E-03
44		1.28E+05	92	6.75E+01	140	21 6.00E+00	188	1.02E+00	236	7.50E-04
45	12	1.00E+05	93	6.50E+01	141	5.40E+00	189	1.01E+00	237	5.00E-04
46		8.50E+04	94	6.10E+01	142	5.00E+00	190	1.00E+00	238	1.00E-04
47		8.20E+04	95	5.90E+01	143	22 4.75E+00	191	9.75E+01	239	1.00E-05
48		7.50E+04	96	5.34E+01	144	4.00E+00	192	9.50E+01		

La libreria a 44 gruppi è stata posta a confronto con la libreria a 238 gruppi da cui è stata generata utilizzando un set di 33 problemi di benchmark in modo da poter verificare che il collassamento, eccetto che per i sistemi energetici intermedi, sia una rappresentazione accettabile della v5-238. La validazione della libreria all'interno del sistema SCALE è basata su un confronto dei valori calcolati del fattore di moltiplicazione effettivo (k_{eff}) in 92 esperimenti di criticità ed 1 esperimento di sottocriticità. Gli esperimenti in questione differiscono tra di loro per le diverse configurazioni di combustibile presente nei reattori ad acqua legge-

ra. I risultati hanno evidenziato che la struttura a 44 gruppi è una rappresentazione accettabile di quella a 238 gruppi per i sistemi a spettro termico e veloce; mentre per i sistemi a spettro energetico intermedio sarebbe richiesta una struttura a gruppi più dettagliata in tale intervallo energetico od uno spettro di collassamento più appropriato. In ogni modo, i calcoli di validazione indicano che la libreria a 44 gruppi è uno strumento accurato nella predizione della criticità per assemblies di tipo LWR. I risultati della validazione non mostrano scostamenti apprezzabili per combustibile UO_2 e discostamenti dell'ordine del 0.5 a 1% per i sistemi molto termici ad ossidi misti (MOX). Tale discostamento è causato dall'inadeguata rappresentazione delle sezioni d'urto del Plutonio nei dati ENDF/B-V. In sintesi l'utilizzo della libreria v5-44 è raccomandata solamente per combustibili UO_2 in sistemi LWR termici completamente moderati.

ENDF/B-VI.8 a 238 gruppi

La libreria ENDF/B-VI Release 8 è una libreria per analisi di criticità generata con il sistema di processamento delle sezioni d'urto AMPX. Essa contiene 342 nuclidi che includono 17 moderatori con scattering termico (dati $S[\alpha, \beta]$). Con l'obiettivo di testare la libreria, sono stati effettuati 241 benchmark con esperimenti di criticità effettuando un confronto tra i risultati ottenibili utilizzando le ENDF/B-V e le ENDF/B-VI. I risultati ottenuti con la libreria ENDF/B-V sono essenzialmente consistenti con quelli ottenuti con la libreria ENDF/B-VI. Si è quindi stabilito che la libreria a 238 gruppi ENDF/B-VI è accettabile per l'utilizzo nei calcoli di criticità e nelle applicazioni di fisica del reattore.

ENDF/B-VII.0 a 238 gruppi

La libreria presenta una struttura a gruppi ed uno spettro di processamento identici a quelli utilizzati della ENDF/B-VI. La ENDF/B-VII.0 contiene 417 nuclidi che includono 19 moderatori con scattering termico. La libreria presenta inoltre due versioni di dati per Al-27 e Fe-56. Per ciascun di questi due isotopi i dati di sezione d'urto nella regione termica sono basati sulla legge di valutazione dello scattering termico; i dati di sezioni d'urto nella regione non-termica utilizzano, invece, l'approssimazione "free-gas" per le collisioni nel range energetico termico. Le ENDF/B-VII.0 sono state testate utilizzando una suite di problemi benchmark con le ENDF/B-VI. I risultati dimostrano che anche le ENDF/B-VII possono essere utilizzate per l'utilizzo in calcoli di criticità e applicazioni in fisica del reattore.

All'interno delle librerie ENDF/B-V, ENDF/B-VI, ENDF/B-VII sono ugualmente presenti dati di librerie puntuali continue in energia (CE) che sono disponibili per l'utilizzo nella sequenza CENTRM/PMC e nel modulo KENO.

In Tab. 3 si riporta l'elenco di tutte le librerie per calcoli di reticolo presenti in SCALE 6.1.3. Per ciascuna libreria viene specificato: il nome alfanumerico utilizzato in una simulazione di calcolo, la descrizione del tipo di libreria utilizzata e la sorgente primaria di dati di sezioni d'urto da cui la libreria è tratta.

Tabella 2.3: Librerie di sezioni d'urto presenti in SCALE per analisi fisica di reticoli

Nome alfanumerico	Descrizione	Sorgente primaria dei dati di sezione d'urto
v5-44 (44groupndf5)	ENDF/B-V libreria neutronica a 44-gruppi	Collassamento da una libreria ENDF/B-V a 238 gruppi
v5-238 (238groupndf5)	ENDF/B-V libreria neutronica a 238-gruppi	Dati ENDF/B-V
v6-238	ENDF/B-VI libreria neutronica a 238-gruppi	Dati ENDF/B-VI Release 8
v7-238	ENDF/B-VII libreria neutronica a 238-gruppi	Dati ENDF/B-VII Release 0

Nell'effettuare simulazioni che coinvolgono calcoli di reticoli, il codice raccomanda di utilizzare la libreria di sezioni d'urto multigruppo v7-238 che è la libreria più recente disponibile in SCALE 6.1.3. L'utilizzo di una libreria ad un numero minore di gruppi (v5-44) da una parte riduce i tempi di calcolo, ma dall'altra potrebbe fornire risultati non soddisfacenti perché collassata con uno spettro che può risultare leggermente differente di quello del problema d'interesse. Un buon compromesso tra velocità ed accuratezza di calcolo può essere l'utilizzo della funzione *parm=weight* presente nel modulo di controllo TRITON. Tale funzione utilizza lo spettro del problema da simulare per collassare la libreria a 238 gruppi utilizzata nel calcolo con una a 49 gruppi.

Da un punto di vista strettamente calcolativo, la sequenza T-NEWT realizza l'autoschermo sulle librerie di sezioni d'urto disponibili in SCALE 6.1.3 invocando alternativamente tre sequenze funzionali: BONAMI, NITAWL e CENTRM.

2.2.1.1 Sequenze funzionali NITAWL e BONAMI

Le sequenze funzionali NITAWL e BONAMI eseguono il processamento delle sezioni d'urto rispettivamente nel range delle risonanze risolte e non risolte. In SCALE 6.1.3 la sequenza NITAWL è disponibile solo per i dati di sezioni d'urto ENDF/B-V, mentre la sequenza BONAMI è disponibile unicamente per i dati di sezioni d'urto ENDF/B-VI ed ENDF/B-VII. A seguire, si presentano nel dettaglio le caratteristiche funzionali ed i metodi di calcolo utilizzati dalle sequenze funzionali NITAWL e BONAMI.

Bonami

Il modulo realizza calcoli Bondarenko per la valutazione dell'autoschermo dovuto alle risonanze. BONAMI accede ad una libreria di dati master in formato AMPX che contiene i fattori di Bondarenko, realizza un calcolo di autoschermo basato sul metodo Bondarenko e

produce un set di dati master – sempre in formato AMPX - problema-dipendenti. Tale approccio utilizza un'espressione analitica semplice per lo spettro neutronico derivante dall'approssimazione alle risonanze strette (NR) insieme con l'uso della "teoria dell'equivalenza" per tenere in conto gli effetti di eterogeneità.

Aspetti teorici

Nei calcoli dell'autoschermo multigruppo, l'obiettivo è la valutazione delle sezioni d'urto efficaci che, in riferimento al g-esimo gruppo e all'i-esimo nuclide, assumono la formulazione:

$$\bar{\Sigma}_g^i = \frac{\int_g \Sigma^i(u) \phi(u) du}{\int_g \phi(u) du} \quad (2.1)$$

Essendo generalmente noti i valori delle sezioni d'urto (ad es. parametri di risonanza o dati tabulati), il problema si sposta alla determinazione dello spettro neutronico. Il metodo Bondarenko assume un'espressione analitica semplice dello spettro del flusso neutronico in un mezzo omogeneo infinito.

$$\phi(u) \sim \frac{1}{\Sigma_t(u)} \quad (2.2)$$

Dove $\phi(u)$ è il flusso per unità di letargia u , e $\Sigma_t(u)$ è la sezione d'urto macroscopica totale. L'espressione precedente è giustificabile se si ipotizza valida l'approssimazione "Narrow Resonance" (NR) per la quale la densità di collisione viene assunta costante per risonanze molto strette.

$$F(u) \equiv \Sigma_t(u) \cdot \phi(u) = \text{cost.} \quad (2.3)$$

Utilizzando la relazione (2.2), l'equazione (2.1) è riconducibile alla seguente formulazione:

$$\bar{\sigma}_g^i = \frac{\int_g \frac{\sigma^i(u)}{\sigma_t^i(u) + \sigma_o^i(u)} du}{\int_g \frac{1}{\sigma_t^i(u) + \sigma_o^i(u)} du} \quad (2.4)$$

Dove si è posto che:

$$\sigma_o^i(u) \equiv \sum_{j \neq i} N_j \sigma_t^j(u) / N_i \quad (2.5)$$

La sezione d'urto efficace risulta quindi funzione del gruppo energetico (u), di σ_o e della temperatura (effetto Doppler). Se si definisce un valore di diluizione infinita per un processo come il limite dell'espressione (2.4) per $\sigma_o = \infty$:

$$\bar{\sigma}_g^{id} = \frac{\int_g \sigma^i(u) du}{\int_g du} \quad (2.6)$$

È possibile valutare le sezioni d'urto efficaci ipotizzando che abbiano una funzionalità definibile come il prodotto dei "fattori di Bondarenko" e del valore a diluizione infinita:

$$\sigma_g(\sigma_0, T) \equiv F_g(\sigma_0, T) \cdot \bar{\sigma}_g^{id} \quad (2.7)$$

I fattori di Bondarenko sono stati generati per i più importanti processi (fissione, cattura, scattering elastico, trasporto e totale) per 5 o 6 valori di σ_0 che coprano il range tipico dei nuclidi e per 3 o 4 temperature. I valori intermedi vengono valutati per interpolazione delle tabelle esistenti secondo uno schema unico utilizzato dal modulo BONAMI.

Gli effetti di eterogeneità vengono trattati secondo il "teorema di equivalenza" per il quale un sistema eterogeneo reticolare caratterizzato da una sezione d'urto di fuga (σ_e) ha lo stesso integrale di risonanza di una miscela omogenea con una sezione d'urto pari a $\sigma_0 + \sigma_e$. Quindi, per il caso eterogeneo, gli effetti di leakage o di rallentamento tra le diverse zone, vengono inclusi aggiungendo una "sezione d'urto di fuga effettiva" σ_e al termine σ_0 . In particolare, per un corpo convesso utilizzando l'approssimazione razionale di Wigner la sezione d'urto di fuga è pari a:

$$\sigma_e = \frac{1}{\bar{l}N_i} \quad (2.8)$$

In cui \bar{l} è la lunghezza della corda media (pari a $4\text{Volume}/\text{Superficie}$) ed N_i è la densità numerica del nuclide che deve essere calcolato. La presenza di celle ripetute nelle vicinanze di altre celle influenza il flusso visto da una singola cella provocando un autoschermo addizionale delle risonanze delle sezioni d'urto. Questo effetto viene tipicamente conteggiato utilizzando i fattori di Dancoff che andranno a modificare il termine \bar{l} . Se, ad esempio, si considera una cella cilindrica e si utilizza l'approssimazione di Sauer per la correzione di Dancoff per un lattice quadrato

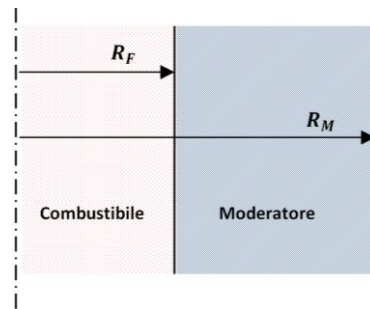


Figura 2.4: modellizzazione cella cilindrica nell'approssimazione di Sauer

la lunghezza della corda media è data da:

$$\bar{l} = 2R_F \quad (2.9)$$

con R_F raggio del combustibile, mentre il fattore di Dancoff è dato dall'espressione:

$$C = \exp(-\tau \Sigma_M \bar{l} V_M / V_F) / (1 + (1 - \tau) \Sigma_M \bar{l} V_M / V_F) \quad (2.10)$$

dove V_M ed V_F sono, rispettivamente, il volume del moderatore e del fuel; Σ_M è la sezione d'urto macroscopica totale del moderatore, e τ è un parametro geometrico dato dall'espressione seguente:

$$\tau = \left(\sqrt{\frac{\pi}{4\alpha}} \sqrt{1 + V^*} - 1 \right) \frac{1}{V^*} - \tau_0 \quad (2.11)$$

con $V^* = V_M/V_F$ e α e τ_0 funzioni della tipologia di reticolo. Per un reticolo quadrato, si ha:

$$\alpha = 1.0; \quad \tau_0 = 0.08 \quad (2.12)$$

In conclusione, il metodo è stato pensato per essere applicato alla zona delle risonanze non risolte presenti alle alte energie dove la richiesta di validità dell'approssimazione NR risulta essere maggiormente verificata. Esso, infatti, restituisce risultati poco soddisfacenti per le ampie risonanze risolte sotto i 100 eV dell'U238.

Worker

La funzione primaria di tale modulo è convertire i dati presenti in una libreria master in formato AMPX in una libreria di lavoro nello stesso formato AMPX. In sostanza, Worker processa e combina i dati presenti nelle librerie master in una forma adatta ad essere utilizzata dai codici di trasporto multigruppo presenti in SCALE (XSDRNPM, KENO-VI, KENO V.a, NEWT, CENTRM, e ICE). La libreria di lavoro contiene due tipi di dati:

1. sezioni d'urto gruppo-mediate per un numero arbitrario di processi per neutroni e/o raggi gamma;
2. le matrici di trasferimento totale per neutroni e/o raggi gamma. In molti casi le matrici di trasferimento sono funzione della temperatura. WORKER opera un'interpolazione lineare alla temperatura specificata per il nuclide, ma non estrapola fuori dal range dei dati disponibili.

Il risultato finale generato dal modulo è un set di valori gruppo-mediate per cattura (n,γ), fissione e scattering elastico. Tali valori sono successivamente trasferiti per sostituzione in dedicate posizioni durante il processamento. Se la libreria master contiene dati di parametri di risonanza, tali parametri non vengono inclusi in una libreria di lavoro. Ciò richiede l'aggiustamento di diversi valori "totali" quali, assorbimento, cattura, ecc. per assicurarne la consistenza. L'operazione finale è combinare insieme tutte le matrici di trasferimento 2-D in modo da formare un'unica matrice di trasferimento totale. Worker permette anche di produrre una libreria master di selezionati nuclidi interpolati alle specifiche temperature; per tale libreria le matrici di scattering elastiche veloci e termiche vengono combinate e le matrici termiche vengono rinominate aggiungendo 5000 al loro numero MT per evitare che esse possano essere riaggiate se la stessa libreria viene nuovamente riprocessata dal modulo. La libreria master ottenuta può essere corretta per tenere in conto delle risonanze con la sequenza CENTRM/PMC e poi riconvertita in una libreria di lavoro AMPX.

NITAWL

Il modulo *NITAWL* (Nordheim Integral Treatment And Working Library production) assolve due compiti fondamentali:

1. Sulla base della descrizione del sistema specificato dall'utente, realizza l'autoschermo risonante problema-dipendente applicando il trattamento integrale di Nordheim che risolve l'equazione del trasporto per una modellizzazione geometrica a due-regioni: una regione di assorbitore circondata da un moderatore esterno. L'approccio Nordheim è generalmente migliore del metodo Bondarenko poiché non utilizza l'approssimazione NR;
2. Legge le librerie di sezioni d'urto presenti in una libreria master o di lavoro in formato AMPX e produce una libreria di lavoro in formato AMPX;

In NITAWL la procedura di valutazione dell'autoschermo viene eseguita in riferimento a valori a diluizione infinita. In tal modo viene enormemente semplificata la procedura di elaborazione basilare dei codici e permette di realizzare calcoli Nordheim che posso essere utilizzati con qualsiasi libreria di input che contiene i valori di riferimento a diluizione infinita. Essa, inoltre, permette di processare selettivamente gruppi di risonanze senza la richiesta di rigenerare le librerie di input.

Il metodo Nordheim a due-regioni produce sezioni d'urto accurate per molte classi di problemi. In ogni modo presenta diverse limitazioni quali:

1. La composizione dell'assorbitore in NITAWL è limitato ad un singolo materiale risonante combinato con due moderatori miscelati, in tal modo non vengono trattati gli effetti di sovrapposizione delle risonanze;
2. Ogni livello risonante viene trattato indipendentemente, così facendo il formalismo Reich-Moore utilizzato nelle ENDF/B-VI e VII non può essere utilizzato. NITAWL può quindi essere applicato solamente alle librerie ENDF/B-V presenti in SCALE 6.1.3.
3. Regioni multiple di assorbitori, quali ad esempio un combustibile dissolto in una soluzione, non può essere trattato perché il metodo prevede che la regione esterna non contenga materiali risonanti.

Aspetti teorici

Il metodo del trattamento integrale di Nordheim coinvolge una soluzione del flusso neutronico energia dipendente in una regione materiale contenente un assorbitore risonante e un massimo di due moderatori miscelati. La regione del moderatore può essere infinita in estensione o può corrispondere ad un piano 1-D, un cilindro, una sfera circondata da un mezzo moderatore nel quale il flusso neutronico è spazialmente piatto e varia lentamente con l'energia. La presenza di più di una zona di moderatore nel mezzo moderante (ad es. un lattice di fuel pin) viene tenuta in conto attraverso l'utilizzo del fattore di Dancoff. Il modello utilizza la seguente espressione per la densità di collisione funzione dell'energia del neutrone.

$$\phi(E)\Sigma_t(E) = \sum_{i=1}^3 \left[\left((1 - P_0^*(E)) / \alpha_i \right) \int_E^{E(1-\alpha_i)} \phi(E') \Sigma_{si}(E') \frac{dE'}{E'} + P_0^*(E) \Sigma_{Ti}(E) W(E) \right] \quad (2.13)$$

dove $\phi(E)$ è il flusso neutronico [$\text{n}/\text{cm}^2\text{s}$], $\Sigma_t(E)$ è la sezione d'urto totale macroscopica nell'assorbitore [cm^{-1}], i è l'indice del nuclide (1 per l'assorbitore, 2 per il primo moderatore miscelato e 3 per il secondo moderatore miscelato), $P_0^*(E)$ è la probabilità di fuga "first-flight" Dancoff-corretta per la regione dell'assorbitore, α_i è la massima frazione di energia persa da un neutrone in una collisione elastica con un nuclide di massa A_i ; $\Sigma_{Ti}(E)$ e $\Sigma_{si}(E')$ sono le sezioni d'urto macroscopiche totali e di scattering elastico del i -esimo nuclide (cm^{-1}), e W è la variazione energetica assunta del flusso neutronico nella regione esterna del moderatore. Il modello matematico definito comprende una serie di approssimazioni:

1. Ogni nuclide risonante può essere trattato senza considerare altri nuclidi risonanti che possono essere presenti nel sistema. In pratica, non si considerano alcune sovrapposizioni di risonanze tra i nuclidi;
2. Il flusso neutronico è spazialmente uniforme nella regione dell'assorbitore e del moderatore;
3. La presenza di altri assorbitori nel sistema può essere trattata con la probabilità di fuga "first flight";
4. La presenza di altre zone di assorbitore nel sistema può essere tenuta in conto con un fattore di Dancoff; tale fattore corrisponde alla probabilità di trasmissione "first-flight" attraverso il moderatore. Ad esempio, un fattore di Dancoff pari a zero, corrisponde ad una singola zona di assorbimento isolata dal resto del moderatore. Al contrario, un fattore di Dancoff pari a 1.0 corrisponde ad un mezzo infinito di materiale assorbitore senza la presenza esterna di moderatore nel sistema.

NITAWL non contiene il trattamento per le risonanze non risolte che deve pertanto essere eseguito col modulo BONAMI precedentemente descritto.

Malocs

Malocs (Miniature AMPX Library Of Cross Sections) è un modulo per collassare le librerie di sezioni d'urto master di neutroni, raggi gamma o librerie accoppiate neutroni-gamma in formato AMPX. In SCALE 6.1 esso è disponibile unicamente per le sequenze T-NEWT e T-DEPL.

2.2.1.2 Sequenza funzionale CENTRM

La sequenza *CENTRM* è lo schema di processamento più generale presente in SCALE 6.1.3 ed è stato utilizzato per effettuare i calcoli di autoschermo in questo lavoro di tesi. Esso invoca consecutivamente i seguenti moduli: CRAWDDAD, BONAMI, WORKER, CENTRM, PMC,

CAJUN, CHOPS, MALOCS, NEWT. Nel prosieguo, verranno pertanto descritte le caratteristiche funzionali di tutti quei moduli non descritti nei precedenti paragrafi ed il ruolo svolto da tali moduli nella catena di calcoli di autoschermo.

CRAWDAD

Il modulo CRAWDAD (Code to Read And Write Data for Discretized solution) converte il formato generale dei dati nucleari delle librerie puntuali presenti in SCALE 6.1.3 in un particolare formato necessario per ottenere la soluzione discretizzata in energia fornita da CENTRM. Ogni calcolo realizzato con SCALE 6.1.3, che comporti l'utilizzo di sezioni d'urto multigruppo autoschermate valutate dalla sequenza CENTRM/PMC, esegue preliminarmente il modulo funzionale CRAWDAD. I dati nucleari puntuali di ogni nuclide vengono conservati in un file individuale contenuto nella directory dati permanente di SCALE. CRAWDAD legge i files per ogni materiale presente nel calcolo da realizzare e combina tutti i dati in una singola libreria di dati dipendenti dal problema analizzato da CENTRM conservandoli in una directory temporanea di esecuzione. Il codice permette di selezionare il range energetico dei dati puntuali e di scegliere quali reazioni posizionare nella libreria di output per CENTRM. La libreria di output di CENTRM contiene sempre i seguenti tipi di dati nucleari "standard" per tutti i materiali: totale (1); elastico (2); completamente inelastico (4); cattura radiativa (102); fissione (18); nubar totali/pronti/ritardati (452, 455, 456); e le sezioni d'urto (n,α) per ^{10}B e ^7Li .⁵ CRAWDAD interpola i dati alle temperature necessarie per il problema. Il formato generale dei dati puntuali di SCALE 6.1.3 permette la scelta di una differente mesh energetica per ogni temperatura, ma la libreria CENTRM richiede che una singola mesh energetica sia utilizzata per tutte le temperature di una data reazione per un dato materiale (sebbene differenti reazioni possano avere differenti mesh energetiche). CRAWDAD mappa sempre i dati puntuali interpolati alla mesh energetica della temperatura più bassa del materiale nel problema.

CENTRM

Il modulo CENTRM (Continuous Energy TRansport Module) valuta lo spettro neutronico continuo utilizzando diverse approssimazioni deterministiche dell'Equazione di Boltzman in un sistema geometrico monodimensionale (slab, sferico, cilindrico) od in un mezzo omogeneo infinito su uno spettro energetico che varia tipicamente da ~ 0 a 20 MeV . L'obiettivo del codice è fornire flussi angolari e momenti di flusso accurati per applicazioni che richiedono una descrizione ad alta risoluzione della variazione della struttura fine nello spettro energetico neutronico. Una caratteristica tipica di CENTRM è che la combinazione di tecniche di soluzione multigruppo e puntuali permettendo la valutazione di "uno spettro continuo" sull'intero range energetico d'interesse per problemi di "critical safety" o fisica del reattore. Lo spettro continuo consiste nel valore del flusso per unità di letargia definito su una mesh energetica discreta, per la quale viene assunta una variazione lineare del flusso tra i punti

⁵ Nella lista precedente, i numeri posti in parentesi tonde corrispondono ai "numeri mt" delle ENDF/B.

energetici adiacenti. A seconda dell'approssimazione al trasporto specificata, lo spettro può variare come funzione dello spazio, della direzione e dell'energia.

CENTRM risolve la forma a sorgente-fissa (non omogenea) dell'equazione del trasporto con un termine sorgente specificato dall'utente. La sorgente di input può corrispondere ad uno spettro multigruppo nella forma di sorgente volumetrica o di superficie o può essere una "sorgente di fissione" che ha una distribuzione di spettro neutronico appropriato per ogni miscela fissionabile.

Le librerie utilizzabili contengono sezioni d'urto a diversa temperatura che CENTRM interpola alle temperature desiderate utilizzando una tecnica interpolante \sqrt{T} o lineare. L'autoschermo dei dati puntuali nel range delle risonanze non risolte viene trattato applicando la correzione basata sulle sezioni d'urto autoschermate multigruppo. Per tale ragione, è necessario autoschermare le sezioni d'urto nel range delle risonanze non risolte prima di effettuare un calcolo CENTRM. In CENTRM ciò viene realizzato dal modulo BONAMI utilizzando il metodo Bondarenko.

Il range energetico d'interesse viene diviso in tre intervalli definiti, rispettivamente, il range multigruppo superiore (RMS), il range puntuale (RP) ed il range multigruppo inferiore (RMI). Che sono definiti in input.

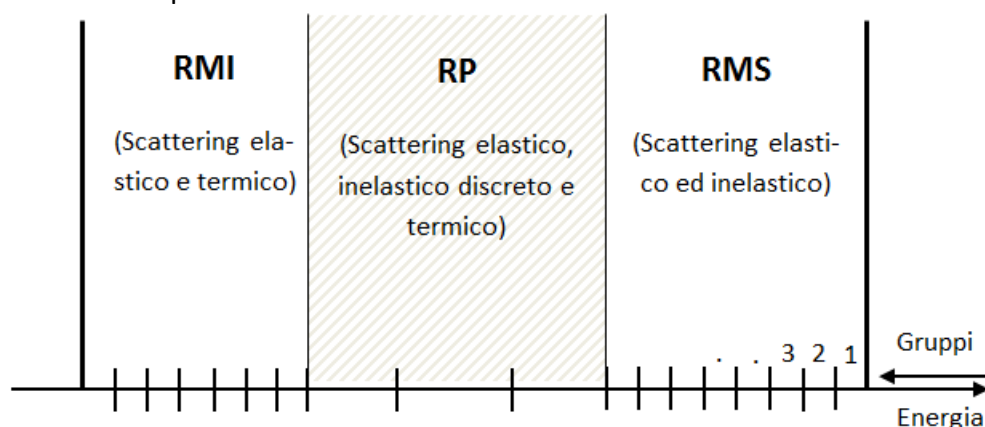


Figura 2.5: Definizione degli intervalli RMI, RP ed RMS

I flussi multigruppo vengono valutati utilizzando le tecniche multigruppo standard per la zona RMI ed RMS, e tali valori vengono poi divisi per l'intervallo letargico corrispondente per ottenere il flusso medio per letargia per ogni gruppo. Tale flusso "pseudo-puntuale" viene assegnato alla letargia media del gruppo, in tal modo vi è un punto energetico per gruppo negli intervalli energetici delle zone RMI ed RMS. In ogni modo per ogni gruppo del RP vi sono generalmente molti punti energetici per i quali CENTRM calcola il valore dei flussi. In tal modo uno spettro problema-dipendente viene ottenuto sull'intero range energetico.

La designazione esatta del range puntuale (RP) è lasciata alla discrezione dell'utente. Generalmente, il range energetico dello spettro puntuale viene scelto in modo da includere l'intervallo dove i più importanti nuclidi assorbitori hanno le risonanze risolte, mentre i calcoli multigruppo vengono realizzati dove le sezioni d'urto hanno una variazione meno accentuata. Il range termico notoriamente presenta una sfida calcolativa a causa della cinematica complicata associata col moto molecolare, coi legami chimici, e con gli effetti dello scattering coerente. Poiché alcuni nuclidi hanno risonanze a basse energie (ad es. le risonanze a 0.3 eV

del Pu^{239} e del U^{235} e la risonanza ad 1 eV nel Pu^{240}), normalmente è preferibile estendere il calcolo puntuale nel range termico in modo da includere l'impatto dello scattering termico sull'autoschermo dovuto alle risonanze. SCALE include librerie separate per i dati cinetici del range puntuale (RP) per i moderatori che hanno dati di scattering termico forniti dalle ENDF/B, e questi sono utilizzati nella soluzione termica di CETRM. I kernel termici per tutti gli altri materiali sono generati internamente da CENTRM sulla base di un modello free-gas.

L'utente può specificare un differente metodo di calcolo di trasporto per le zone RMI, RP e RMS. Le opzioni per il trasporto multigruppo per le zone RMI ed RMS includono le ordinate discrete, la teoria P1, il mezzo omogeneo infinito e il mezzo zona-pesato infinito. Il calcolo puntuale include le stesse opzioni di trasporto del multigruppo con in più un'opzione per un metodo semplificato a due-regioni ed una soluzione integrale del trasporto utilizzando le probabilità di collisione.

In sintesi, il metodo d'autoschermo CENTRM/PMC rimuove molte limitazioni presenti nei metodi Bondarenko e Nordheim. Le sezioni d'urto multigruppo vengono generate direttamente per integrazione delle sezioni d'urto puntuali utilizzando gli spettri problema dipendenti dal problema in esame come funzione peso. Se viene utilizzato come funzione peso il reale spettro neutronico del sistema, allora le "reaction rates" valutate dovrebbero teoricamente essere valori esatti. Nella pratica, i flussi puntuali valutati da CENTRM non sono esatti perché il calcolo di trasporto viene realizzato con un modello 1-D semplificato; in ogni modo, nella maggior parte dei casi, può essere identificato un modello 1-D che approssimi la geometria reale in maniera sufficientemente valida. Nel caso di un reticolo di pin di combustibile, un calcolo di trasporto puntuale 1-D può essere realizzato utilizzando un modello cilindrico Wigner-Seitz con condizioni al contorno di zero leakage per rappresentare ciascuna cella unitaria di combustibile. Gli spettri continui calcolati per il fuel, il clad, il moderatore, ecc., sono utilizzati per processare le sezioni d'urto a gruppi-fini (ad. es. 238 gruppi) per ciascun componente. Le sezioni d'urto schermate per ogni componente del sistema sono successivamente utilizzate in modelli con estensione dimensionale maggiori per tenere in conto gli effetti di leakage tra le celle quale un calcolo su un assembly con un reticolo 2-D col codice NEWT, o un calcolo 3-D col codice multigruppo KENO.

PMC

Il modulo PMC legge lo spettro neutronico continuo generato da CENTRM, calcola le sezioni d'urto problema dipendente gruppo mediate su specifici range energetici, e sostituisce i dati corrispondenti in una libreria master di input in formato AMPX. In tal modo, la libreria originale AMPX può essere corretta per l'autoschermo ed altri effetti spettrali su un selezionato range energetico. Le sezioni d'urto risultanti possono essere fornite a codici che realizzano calcoli a dimensioni geometriche più elevate (2-D o 3-D) quali i codici multigruppo Monte Carlo KENO V.a o KENO-VI od un codice alle ordinate discrete quale XSDRNP o NEWT. In tale approccio, il processamento delle sezioni d'urto multigruppo diventa un elemento attivo dell'intera analisi di trasporto.

Il diagramma di flusso riportato nella Fig. 2.6 riassume le possibili sequenze di calcolo utilizzate dal modulo funzionale CENTRM per ottenere le sezioni d'urto multigruppo problema-dipendente

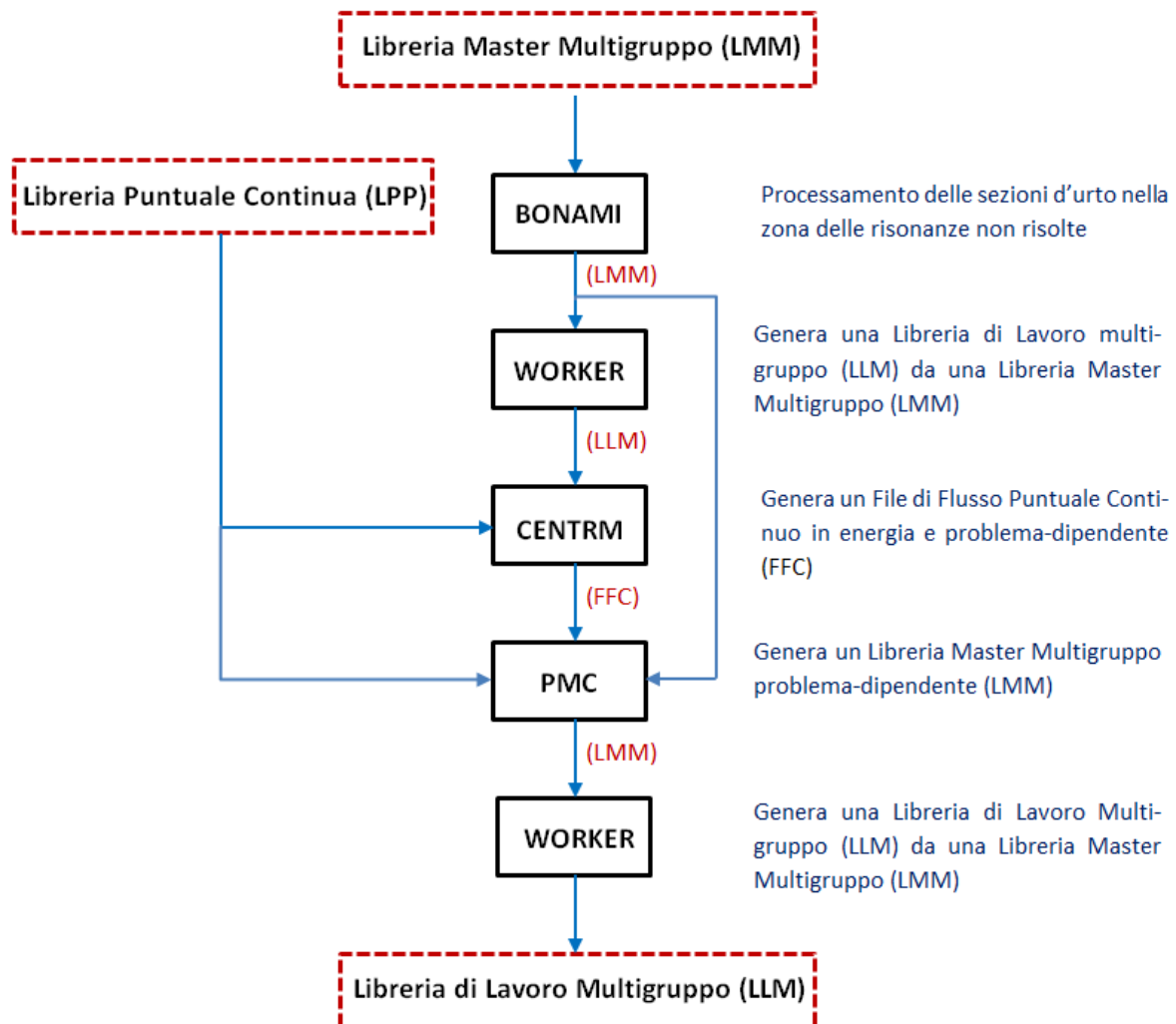


Figura 2.6: Diagramma di flusso della sequenza CENTRM per generare sezioni d'urto problema-dipendente.

2.2.2 Calcoli di trasporto

Il calcolo di trasporto - indipendentemente dal modulo funzionale utilizzato per il processamento delle sezioni d'urto - è stato eseguito col modulo NEWT, il codice deterministico alle ordinate discrete 2-D presente nella suite di SCALE 6.1.3.

NEWT

Il codice NEWT (New Esc-based Weighting Transport) è un codice computazionale di trasporto radiativo bidimensionale (2-D) alle ordinate discrete multigruppo che, utilizzando la tecnica d'approssimazione ESC (Extended Step Characteristic), ha una capacità di discretizzazione spaziale della geometria cartesiana bidimensionale con una struttura a maglia arbitra-

ria. Tale caratteristica lo rende adatto ad eseguire calcoli su problemi basati su domini non-ortogonali caratterizzati da geometrie costituite da poligoni di forma arbitraria. NEWT può essere utilizzato per diverse funzioni quali: calcoli di autovalore, soluzioni di flusso diretto ed aggiunto, calcoli di spettro multigruppo, collassamento di sezioni d'urto materiali-pesate, collassamento ed omogeneizzazione di sezioni d'urto d'assembly, calcolo dei fattori di discontinuità d'assembly (ADF) per assembly interni e riflessi, coefficienti di diffusione, potenza delle pin e fattori di forma a gruppi. Utilizzato all'interno delle sequenze di bruciamento presenti all'interno di TRITON, NEWT fornisce flussi spaziali, sezioni d'urto pesate multigruppo, distribuzione di potenza utilizzata per calcoli di bruciamento utilizzati per multi-materiali e calcoli accoppiati di bruciamento e branch necessari per l'analisi fisica di reticoli.

In questo lavoro di tesi NEWT è stato utilizzato nella sequenza funzionale T-NEWT, presente all'interno del modulo di controllo TRITON, col compito precipuo di realizzare calcoli di trasporto e determinare gli ADF e le sezioni d'urto efficaci necessarie per i successivi calcoli di nocciolo.

L'approccio alle ordinate-discrete utilizzato da NEWT deriva dalla forma integro-differenziale dell'equazione del trasporto di Boltzmann dove la dipendenza da spazio, tempo ed energia sono trattate mediante l'utilizzo di griglie alle differenze finite, mentre il comportamento angolare viene trattato considerando un certo numero di direzioni discrete nello spazio. La soluzione angolare viene accoppiata alla soluzione scalare spaziale attraverso alcune forme di integrazioni numeriche. La funzione di distribuzione angolare, a causa del trattamento angolare dell'approccio alle ordinate-discrete, può essere calcolata direttamente; pertanto tale approccio è il metodo di soluzione preferito in molte applicazioni dove l'anisotropia angolare riveste un ruolo importante. In ogni modo, spesso la sua applicabilità è limitata per le limitazioni geometriche esistenti nel dover utilizzare di un sistema a maglia ortogonale associato con l'approssimazione numerica alle differenze-finite.

La soluzione deterministica dell'equazione del trasporto generalmente calcola una soluzione in termini di flusso delle particelle il quale permette la determinazione delle "reaction rates" che caratterizzano il sistema nucleare. In generale, il metodo alle ordinate discrete 2-D realizza calcoli che forniscono i flussi medi sui quattro lati della maglia e un flusso medio per ogni cella in un problema a griglia rettangolare (approccio alle "diamond-difference"). I flussi medi su ciascun lato del dominio poligonale del problema vengono valutati ed utilizzati per calcolare il flusso medio di cella. Tale processo viene ripetuto per ogni cella nel dominio del problema e, come per l'approccio tradizionale, vengono realizzate delle iterazioni per arrivare a convergenza.

Aspetti teorici

Nelle applicazioni d'interesse dell'ingegneria nucleare l'equazione di Boltzmann è spesso scritta in modo che la variabile dipendente sia il flusso neutronico angolare. La forma tempo-indipendente dell'equazione lineare del trasporto è allora espressa nella forma:

$$\hat{\Omega} \cdot \vec{\nabla} \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E) + \sigma_t(\vec{r}, E) \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E) = Q(\vec{r}, \hat{\Omega}, E) \quad (2.14)$$

dove $\psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E)$ è il flusso angolare alla posizione \vec{r} , in direzione dell'angolo solido $\hat{\Omega}$ e all'energia E ; $\Sigma_t(\vec{r}, E)$ è la sezione d'urto totale macroscopica alla posizione \vec{r} e all'energia E , e $Q(\vec{r}, \hat{\Omega}, E)$ è la sorgente in posizione \vec{r} , in direzione $\hat{\Omega}$ e all'energia E . Il termine sorgente può essere generalmente composto di tre contributi: uno di scattering, uno di fissione ed uno esterno.

Tradizionalmente i metodi alle ordinate discrete sono basati su un'approssimazione alle differenze finite per risolvere il termine di corrente di flusso. Gli schemi di risoluzione sono intimamente connessi alle coordinate del sistema nelle quali sono sviluppate le differenti equazioni e diventa difficile rappresentare volumi non-ortogonali all'interno di tale sistema di coordinate. Ad esempio, non è possibile rappresentare esattamente un cilindro in un sistema di coordinate cartesiane 2-D; è necessario approssimare il cilindro con un certo numero di celle rettangolari. Un'approssimazione migliore può richiedere un grosso numero di celle computazionali. In ogni modo, l'approssimazione ESC per celle computazionali discretizzate permette l'utilizzo di celle computazionali non-ortogonali costituite da poligoni arbitrari. Utilizzando questo metodo, praticamente ogni forma può essere rappresentata all'interno di una griglia ortogonale con un'approssimazione molto stretta.

Metodo Caratteristiche a passo - SC

Il metodo delle caratteristiche risolve l'equazione del trasporto analiticamente lungo una direzione caratteristica all'interno di una cella computazionale. Il flusso angolare ψ viene determinato lungo un generico asse s orientato lungo una direzione caratteristica Ω , acquisendo, in tal modo, una funzionalità sulla variabile s e sull'energia. Il termine di flusso netto in una cella computazionale può quindi risciversi nella forma:

$$\hat{\Omega} \cdot \vec{\nabla} \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E) = \frac{d\psi(s, E)}{ds} \quad (2.15)$$

La cui soluzione generale risulta essere pari a:

$$\psi(s) = \psi_0 e^{-\Sigma_t s} + e^{-\Sigma_t s} \int_0^s Q e^{\Sigma_t s'} ds' \quad (2.16)$$

dove s è la distanza lungo la direzione caratteristica Ω , e ψ_0 è il flusso angolare noto ad $s = 0$. Il valore di ψ_0 viene fornito dalle condizioni al contorno per i lati noti delle celle, ed il flusso angolare o i lati incogniti sono valutati utilizzando l'equazione precedente. I metodi per la determinazione di un appropriato valore di ψ_0 e per la valutazione del termine integrale variano secondo differenti tecniche di risoluzione. Uno degli schemi più semplici impiegati dal Metodo delle Caratteristiche è il metodo delle caratteristiche a passo - Step Characteristic - (MC) sviluppato da Lathrop. In tale criterio, il termine sorgente Q e la sezione d'urto

macroscopica Σ_t vengono assunte costanti all'interno della cella computazionale ed il flusso angolare viene posto costante sui contorni della cella della direzione d'interesse. L'integrazione dell'equazione precedente può essere allora eseguita ottenendo:

$$\psi(s) = \psi_0 e^{-\Sigma_t s} + \frac{Q}{\Sigma_t} (1 - e^{-\Sigma_t s}) \quad (2.17)$$

La Fig. 2.7 mostra una cella computazionale sui cui può essere applicato il metodo SC.

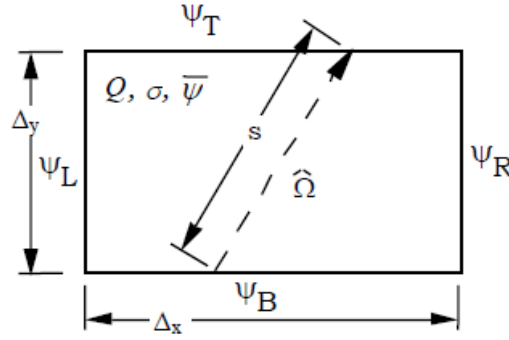


Figura 2.7: Cella rettangolare caratteristica utilizzata nell'approccio SC

Fissata una direzione caratteristica Ω , il flusso angolare su un qualsiasi lato incognito può essere espresso in funzione dei flussi angolari medi dei restanti lati. In riferimento alla direzione caratteristica Ω della Fig. 2.7, il flusso incognito ψ_T può essere valutato come un media lineare pesata dei flussi noti ψ_L e ψ_B . I flussi su ciascuno dei due lati - assunti costanti lungo la lunghezza di ogni lato - rappresentano il flusso angolare medio nella direzione Ω e sono noti dalle condizioni al contorno esterne o da un calcolo derivante da una cella adiacente.

Le direzioni caratteristiche vengono definite da un set di quadratura in modo che i flussi angolari risultanti possano essere numericamente integrati per ottenere il flusso angolare. Conoscendo la lunghezza dei lati di una cella rettangolare (Δx e Δy) e la direzione dei coseni di Ω nel piano x-y (μ e η), una funzione per la lunghezza s può essere facilmente determinata. La soluzione per $\psi(s)$ dell'equazione precedente può essere integrata lungo la lunghezza di ciascuno dei lati incogniti per determinare il flusso angolare medio del lato sconosciuto. Una volta noto il flusso angolare per tutti i lati, un bilancio neutronico su una cella può essere utilizzato per determinare il flusso angolare medio della cella.

Il metodo SC è basato su celle rettangolari, ma la derivazione dell'equazione precedente non fa alcuna assunzione circa la forma della cella. Essa richiede semplicemente la conoscenza delle relazioni tra i bordi delle celle lungo la direzione delle caratteristiche. Quindi, il metodo non è ristretto ad alcuna geometria particolare e, poiché è un'estensione dell'approccio SC ad una cella generalizzata, viene definito metodo delle Caratteristiche a Passo Esteso (ESC).

Metodo Caratteristiche a passo esteso (ESC)

Le due principali assunzioni del metodo ESC sono le seguenti:

- 1) All'interno di ogni cella computazionale tutte le grandezze fisiche (ad es. Σ_t e Q) sono uniformi;
- 2) I contorni delle celle sono definiti da linee rette.

La seconda assunzione comporta che le celle computazionali siano limitate da poligoni. In ogni modo, da una parte non viene posta alcuna restrizione alla forma dei poligoni o al numero di lati costituenti il poligono stesso ma dall'altra vi è una limitazione sulla dimensione dei poligoni. Nelle applicazioni pratiche, è improbabile che le proprietà rimangano costanti su volumi significativi., pertanto tale metodo è un'approssimazione povera quando il volume delle celle diviene troppo grande. Infatti, sebbene la Σ_t è una proprietà materiale che può rimanere spazialmente costante, il termine sorgente Q , che dipende dal flusso neutronico, varierà necessariamente con la posizione. In ogni modo, anche se una soluzione esatta richiederebbe una cella infinitesima, ci si aspetta che l'approssimazione sarà ragionevole per celle computazionali di dimensioni tali che la variazione del flusso, e quindi della sorgente, sia trascurabile su tutto il dominio della cella.

Nella generica configurazione geometrica, come illustrato nella Fig. 2.8, ogni lato della cella può avere uno dei tre possibili attributi relativi al flusso delle particelle in una direzione specifica:

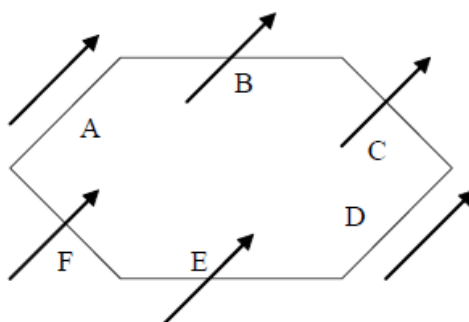


Figura 2.8: Orientamento dei lati di una cella in riferimento ad una data direzione vettoriale

- 1) Il flusso che attraversa un lato entra nella cella (lati E ed F);
- 2) Il flusso che attraversa un lato esce dalla cella (lati B ed C);
- 3) Il flusso è parallelo all'orientazione di una lato (lati A e D).

In termini matematici i tre casi precedenti assumono la seguente formulazione:

- 1) $\hat{\Omega}_k \cdot \hat{n}_i < 0$
- 2) $\hat{\Omega}_k \cdot \hat{n}_i > 0$
- 3) $\hat{\Omega}_k \cdot \hat{n}_i = 0$

dove \hat{n}_i è un vettore unitario nella direzione normale uscente dalla cella al lati i-esimo, e $\hat{\Omega}_k$ è l'elemento k^{th} discreto di un set di direzioni caratteristiche. Il lato appartenente alla categoria 1 verrà definito come un lato "entrante" rispetto alla direzione $\hat{\Omega}_k$, mentre il lato appartenente alla categoria 2 verrà definito "uscente". Per semplicità la definizione dell'ultima equazione viene inclusa come caso speciale delle prima. Quindi, le equazioni precedenti si riscrivono come:

Lato i-esimo *entrante* rispetto a $\hat{\Omega}_k$: $\hat{\Omega}_k \cdot \hat{n}_i \leq 0$

Lato i-esimo *uscente* rispetto a $\hat{\Omega}_k$: $\hat{\Omega}_k \cdot \hat{n}_i > 0$

La determinazione dei flussi sui lati uscenti di una cella è possibile a partire dalla conoscenza dei flussi di tutti i lati entranti che sono noti a partire dalla conoscenza delle condizioni al contorno o sarà il lato uscente di una cella adiacente. Tale circostanza è dettata dal fatto che l'intero dominio del problema è costituito da un numero finito di celle tali che, per ogni direzione discreta, vengono percorse in un preciso ordine in modo tale che la soluzione dei flussi in una cella fornisce sufficienti condizioni al contorno per la determinazione dei flussi in una cella adiacente. La conoscenza del flusso di tutti i lati entranti di una cella è sufficiente per trovare il flusso di tutti i lati uscenti. Una volta che il flusso angolare è stato determinato per tutti i lati delle celle per una specificata direzione, è possibile utilizzare un bilancio neutronico per valutare il valore medio del flusso angolare all'interno della cella. Una volta determinato il flusso angolare in ogni cella, una quadratura numerica può essere utilizzata per determinare il flusso scalare in ogni cella nel dominio del problema. I flussi scalari vengono successivamente utilizzati per determinare le "reaction rates" di fissione e scattering in ogni cella e per aggiornare il valore della sorgente media di cella Q . Il processo viene ripetuto e le iterazioni continuano sino a che il flusso scalare converge all'interno di una tolleranza prestabilita.

Bilancio neutronico all'interno di una cella computazionale

Una volta che i flussi angolari sono stati valutati per tutti i lati delle celle, è necessario valutare il flusso angolare medio di cella. In ossequio al principio di conservazione della massa, ciò può essere ottenuto mediante una condizione di bilancio neutronico applicata alla cella. Il bilancio neutronico per una cella arbitraria in stato stazionario è esprimibile come:

$$\left[\begin{array}{c} \text{numero netto di} \\ \text{neutroni che si muovono} \\ \text{in direzione } \hat{\Omega} \text{ uscendo} \\ \text{dalla cella} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{numero di neutroni} \\ \text{rimossi dalla cella} \\ \text{o dalla direzione } \hat{\Omega} \\ \text{per interazione} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{numero di neutroni} \\ \text{prodotti nella cella} \\ \text{che si muovono nella} \\ \text{direzione } \hat{\Omega} \end{array} \right]$$

In termini matematici l'espressione precedente assume la seguente formulazione:

$$\oint_S \vec{n} \cdot \hat{\Omega}_k \psi dS + \Sigma_t \bar{\psi} V = QV \quad (2.18)$$

dove \vec{n} è la direzione della normale uscente da ogni lato della cella e V è il volume bidimensionale della cella. In questo contesto, S rappresenta l'area di superficie o il perimetro della cella. Quindi, per una cella con m lati, ciascun lato ha una costante angolare di flusso $\bar{\psi}_i$ ed una direzione normale uscente \vec{n}_i ,

$$\bar{\psi}_{cell} = \frac{Q}{\Sigma_t} - \frac{1}{\Sigma_t V} \sum_{i=1}^m \bar{\psi}_i \int_{S_i} \vec{n}_i \cdot \hat{\Omega}_k dS_i \quad (2.19)$$

poiché ogni cella è un poligono, ogni lato sarà una linea retta e $\vec{n}_i \cdot \hat{\Omega}_k$ saranno costanti lungo la lunghezza del lato. L'equazione precedente può essere allora semplificata per ottenere:

$$\bar{\psi}_{cell} = \frac{Q}{\Sigma_t} - \frac{1}{\Sigma_t V} \sum_{i=1}^m \bar{\psi}_i (\vec{n}_i \cdot \hat{\Omega}_k L_i) \quad (2.20)$$

dove L_i è la lunghezza del i -esimo lato ed il termine in parentesi rappresenta il coefficiente di leakage per ciascun lato.

Fattori di discontinuità degli assembly

Nei calcoli nodali multi-assembly o nei calcoli di nocciolo, le soluzioni al trasporto dei reticoli sono utilizzate per generare le sezioni d'urto omogeneizzate a pochi gruppi. Tali sezioni d'urto sono in generale ottenute da un singolo calcolo di trasporto su un assembly con condizioni al contorno di corrente nulla. La generazione di sezioni d'urto omogeneizzate a pochi gruppi per calcoli di nocciolo generalmente include la generazione di fattori di discontinuità (parametri aggiuntivi utilizzati per preservare le "reaction rates" e le correnti d'interfaccia nei processi d'omogeneizzazione). La discontinuità del flusso all'interfaccia di un assembly che può sorgere dall'uso di sezioni d'urto omogeneizzate, viene illustrata nella figura seguente:

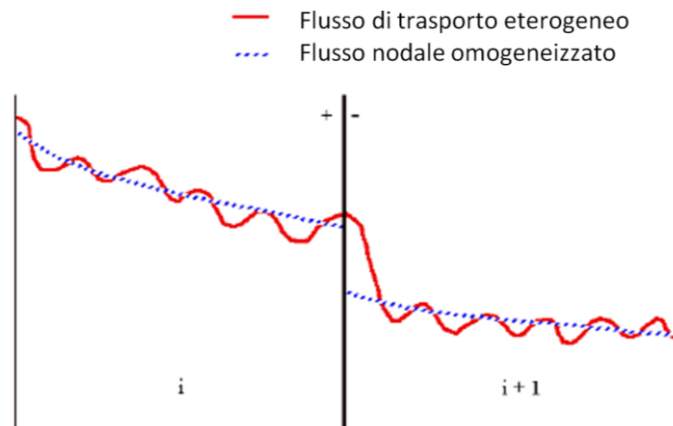


Figura 2.9: Andamento del flusso omogeneo ed eterogeneo in una soluzione multi-assembly

In un calcolo nodale il flusso omogeneo risulta essere discontinuo all'interfaccia tra gli assembly; al contrario in un calcolo di trasporto il flusso eterogeneo è continuo all'interfaccia

tra gli assembly. Per assicurare la continuità all'interfaccia tra gli assembly, si impone la seguente condizione tra due nodi i ed $i+1$:

$$\phi_{i,omogeneo}^+ \cdot F_i^+ = \phi_{i+1,omogeneo}^- \cdot F_{i+1}^- \quad (2.21)$$

dove F_i^+ e F_{i+1}^- sono fattori di discontinuità degli assembly (ADF) su ogni lato dell'interfaccia tra gli assembly i ed $i+1$. Gli ADF sull'interfaccia degli assembly sono allora definiti come il rapporto tra il flusso eterogeneo ed il flusso omogeneo all'interfaccia dell'assembly.

$$F_i^+ = \frac{\phi_{eterogeneo}}{\phi_{i,omogeneo}^+}, \quad F_{i+1}^- = \frac{\phi_{eterogeneo}}{\phi_{i+1,omogeneo}^-} \quad (2.22)$$

In un calcolo a singolo assembly con condizioni al contorno di corrente nulla, il flusso eterogeneo su ciascun contorno viene calcolato come il flusso scalare medio di superficie sul contorno, al contrario il flusso omogeneo ad ogni contorno è semplicemente il flusso medio dell'assembly. Quindi, per ogni gruppo energetico, l'ADF viene calcolato come il rapporto del flusso medio sul contorno ed il flusso medio sull'assembly.

In una configurazione che prevede un assembly posto a ridosso di un baffle ed un riflettore, NEWT applica un'approssimazione alla diffusione multigruppo monodimensionale (1-D) per determinare l'ADF al contorno dell'assembly. In tale approssimazione si assume che il riflettore è infinito e che il flusso scalare vada a zero all'infinito. L'ADF di riflettore può essere allora valutato analiticamente utilizzando questa condizione al contorno insieme con la conoscenza della corrente media di superficie e valutando il flusso scalare all'interfaccia assembly/riflettore.

Condizioni al contorno

NEWT permette la specificazione di tutte le possibili condizioni al contorno – approssimazioni matematiche utilizzate per descrivere il comportamento dei neutroni quando giungono sul contorno del sistema analizzato – per i sistemi geometrici cuboidali. In sistemi con superfici non rettangolari, il codice permette la specificazione delle sole condizioni al contorno bianche e di vuoto. Nel dettaglio, le condizioni al contorno supportate sono: riflessione, bianca, vuoto e periodica.

Condizione al contorno di riflessione

Nella condizione al contorno di riflessione il flusso angolare uscente viene posto uguale al flusso angolare entrante nella direzione corrispondente ad una riflessione a specchio o speculare. In termini di flusso si ha:

$$\psi(\vec{r}_s, \hat{\Omega}, E, t) = \psi(\vec{r}_s, \hat{\Omega}_{ref}, E, t) \quad (2.23)$$

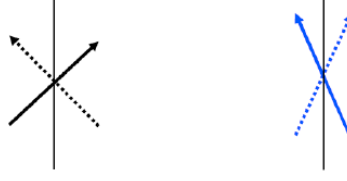


Figura 2.10: Condizione al contorno di riflessione su entrambi i lati

La Fig. 2.10 mostra una determinata quantità – data dalla lunghezza della freccia – di neutroni che lasciano il sistema in una certa direzione (freccia tratteggiata) ed una medesima quantità di neutroni che entrano nel sistema con un angolo speculare a quella della direzione di uscita dei neutroni stessi.

Condizioni al contorno bianche

Le condizioni al contorno bianche prevedono una serie di flussi angolari entranti di stessa ampiezza che rientrano isotropicamente nel sistema tale che il flusso angolare netto attraverso il contorno sia nullo.

$$\psi(\vec{r}_s, \hat{\Omega}, E, t) = 4J_n^+(\vec{r}_s, E, t) \quad (2.24)$$

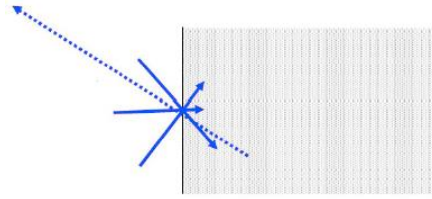


Figura 2.11: Condizioni al contorno bianche su lato sinistro del sistema

Condizioni al contorno di vuoto

La condizione al contorno di vuoto prevede che nessun neutrone entri dal contorno. Pertanto, qualsivoglia neutrone uscente da una porzione del dominio del sistema con condizione al contorno di vuoto viene perso definitivamente. La Fig. 2.12 illustra graficamente la situazione che si viene a determinare ai contorni del sistema.

$$\psi(\vec{r}_s, \hat{\Omega}, E, t) = 0, \quad \hat{n} \cdot \hat{\Omega} < 0 \quad (2.25)$$

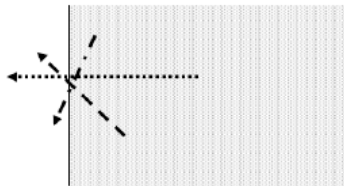


Figura 2.12: Condizione al contorno di vuoto sul lato sinistro del sistema

Condizione al contorno periodica

Nella condizione al contorno periodica, il flusso angolare entrante da un contorno è uguale in ampiezza e direzione a quello uscente dal contorno opposto. La Fig. 2.13 mostra il flusso uscente da un contorno (linea tratteggiata) che rientra con lo stesso angolo sul contorno opposto (linea continua).

$$\psi(\vec{r}_s, \hat{\Omega}, E, t) = \psi(\vec{r}_s + \Delta r, \hat{\Omega}', E, t) \quad (2.26)$$

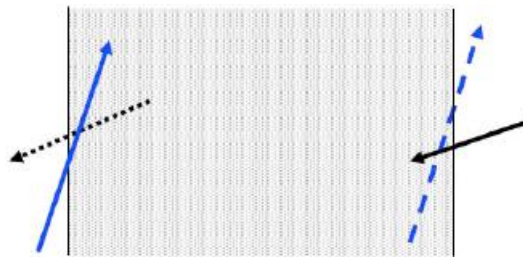


Figura 2.13: Condizione al contorno periodica

A conclusione del paragrafo riguardante il metodo di calcolo deterministico utilizzato in questo lavoro di tesi, nella Fig. 2.14 si riporta il diagramma di flusso complessivo adottato dalla sequenza funzionale T-NEWT posta all'interno della sequenza di controllo TRITON.

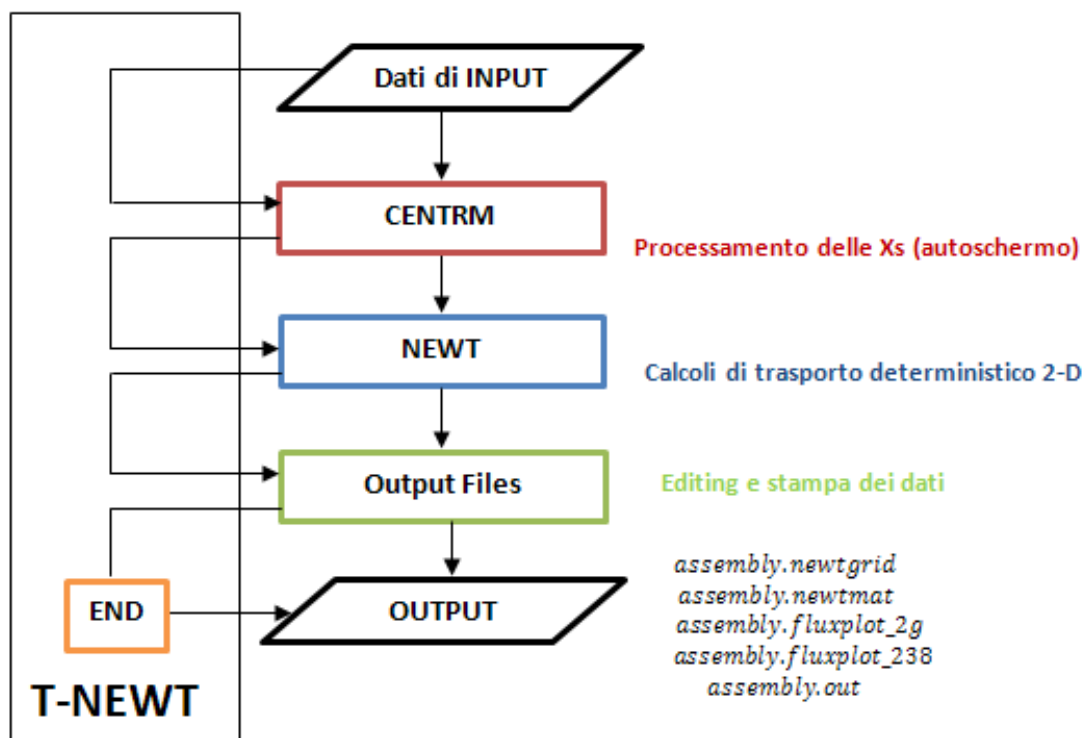


Figura 2.14: Diagramma di flusso della sequenza di calcolo T-NEWT

La sequenza T-NEWT restituisce in output un file in formato testo (ad es. assembly.out) contenente il valore dei parametri neutronici calcolati (coefficiente di moltiplicazione effetti-

vo, spettri critici, sezioni d'urto efficaci, ADF, ecc.) e quattro file in formato postscript che contengono: la rappresentazione grafica della griglia computazionale della geometria del problema (ad es. `assembly.newtgrid`), la rappresentazione grafica della distribuzione geometrica dei materiali costituenti il sistema (ad es. `assembly.newtmatl`), le mappe di flusso ad un numero di gruppi pari alla libreria di sezione d'urto utilizzata nel calcolo (ad es. `assembly.fluxplot_44g`) e le mappe di flusso collassate (ad es. `assembly.fluxplot_2g`).

2.3 Serpent

Serpent è un codice di calcolo Monte Carlo 3-D continuo in energia per calcoli di fisica del reattore e di bruciamento sviluppato dal Centro di Ricerca Tecnico VTT in Finlandia nel 2004. La versione disponibile pubblicamente - Serpent 1 - è stata distribuita da OECD/NEA e RSICC sin dal 2009, la versione Serpent 2 è attualmente in una fase di beta-testing, ma disponibile per gli utenti registrati. Le applicazioni per le quali Serpent è indicato includono:

- Omogeneizzazione spaziale e generazione di costanti di gruppo per calcoli di simulazione di reattore deterministici;
- Studi del ciclo del combustibile che coinvolgono calcoli dettagliati di burnup a livello di assembly;
- Modellizzazione di noccioli di reattori di ricerca, (SMR) e altri sistemi purchè accoppiati;
- Applicazioni di multi-fisica accoppiate (Serpent 2);
- Obiettivi educativi e dimostrazione di fenomeni di fisica del reattore;

L'omogeneizzazione può essere realizzata nello spettro critico, o utilizzando una correzione di leakage basata sulla soluzione deterministica B1 delle equazioni. Attualmente si sta implementando la possibilità del calcolo delle costanti di tempo per la simulazione in transitorio, gli ADF nella regione del riflettore e le configurazioni color set, che richiedono la soluzione esplicita del flusso omogeneo locale e che la corrente netta sulla regione da omogeneizzare non si riduca a zero. Tutti gli output numerici sono scritti in un file in formato Matlab per semplificare il post-processamento dei risultati. Il codice dispone anche di un plotter per la geometria e le reaction rate utile per visualizzare la distribuzione dei neutroni ed i risultati dei tally.

Il presente lavoro di tesi ha utilizzato il codice Serpent per la generazione di costanti di gruppo in dedicate regioni omogeneizzate di un sistema assembly-riflettore. Nel prosieguo si descriveranno le caratteristiche del codice che coinvolgono la parte che riguarda la realizzazione dell'obiettivo posto nel lavoro di tesi.

2.3.1 Geometria

Serpent, similmente ad altri codici Monte Carlo, quali MCNP e Keno-VI, permette di costruire la geometria del sistema da analizzare combinando opportunamente superfici o solidi geometrici (macrobody) predefiniti. La costruzione di geometrie complesse viene notevolmente semplificata dall'utilizzo degli universi che permettono la suddivisione della geome-

tria in livelli separati che vengono costruiti in maniera indipendente per poi essere innestati l'uno nell'altro. Il codice contiene anche alcune caratteristiche geometriche speciali per il progetto del combustibile quali: la definizione semplificata delle pastiglie di combustibile, cilindrico e sferico, reticoli quadrati ed esagonali per geometrie di LWR e di reattori veloci, array di cluster circolari per combustibile CANDU.

2.3.2 Materiali

Serpent, come gli altri codici Monte Carlo, gestisce la geometria suddividendola in regioni omogenee di materiali che vengono definite utilizzando superfici e celle. Ogni materiale è costituito da una lista di nuclidi associata con una libreria di sezioni d'urto. Le temperature dei nuclidi vengono fissate nel momento in cui vengono generate le sezioni d'urto e non possono essere successivamente cambiate. Gli assorbitori solubili possono essere definiti miscelando due composizioni di materiali. La concentrazione può essere utilizzata per iterazioni critiche sul k_{eff} .

2.3.3 Condizioni al contorno

Il codice permette di definire le condizioni al contorno che determinano la sorte dei neutroni che finiscono in una regione localizzata al di fuori della geometria. Le opzioni disponibili sono tre:

1. Condizioni al contorno nere: il neutrone scompare;
2. Condizioni al contorno di riflessione: il neutrone viene riflesso indietro nella geometria;
3. Condizioni al contorno periodiche: il neutrone viene spostato sul lato opposto della geometria;

Le condizioni al contorno di cui al punto 2 e 3 possono essere utilizzate per costruire strutture reticolari infinite e semi-infinite. Il modo in cui tali condizioni al contorno vengono gestite da Serpent è in qualche modo differente rispetto ad altri codici Monte Carlo. Riflessione e traslazione invece di fermare il neutrone alla superficie di contorno, vengono gestite da coordinate di trasformazione. Ciò limita la scelta del contorno esterno ad alcuni tipi di superfici specifiche che possono essere utilizzate per definire una struttura reticolare esagonale o quadrata. Vi sono tre opzioni base:

Geometria 2D infinita: la geometria non ha dipendenza sulle coordinate z . Il contorno esterno è definito da un singolo quadrato o cilindro esagonale;

Geometria 3D radialmente od assialmente infinita: Il contorno esterno è definito da un cilindro quadrato od esagonale. Le condizioni al contorno hanno effetto solo nella direzione radiale. Le condizioni al contorno assiali sono nere.

Geometria 3D infinita: Il contorno esterno è definito da un cubo singolo, un cuboide o un prisma esagonale. Le condizioni al contorno hanno effetto in tutte le direzioni.

L'utilizzo del codice per il calcolo di sezioni d'urto efficaci nel sistema assembly-riflettore 2-D ha quindi comportato la necessità di affrontare due problematiche che non permettevano di modellizzare la reale geometria del sistema:

1. l'impossibilità di definire condizioni al contorno miste sul contorno esterno;
2. l'impossibilità di poter utilizzare un dominio esterno rettangolare su cui le BC;

Tali limitazioni sono state superate adottando un dominio quadrato in cui è stata inserita in parallelo una coppia di sistemi assembly-riflettore ed utilizzando uno slab di gadolinio che potesse simulare, su uno dei bordi esterni, le condizioni al contorno di vuoto.

2.3.4 Interazioni fisiche

Le librerie di sezioni d'urto in formato ACE incluse nel package d'installazione sono basate su JEFF-2.2, JEFF-3.1, JEFF-3.1.1, ENDF/B-VI.8 e ENDF/B-VII. Serpent legge le sezioni d'urto continue in energia da librerie in formato ACE. I dati d'interazione sono disponibili per 432 nuclidi a 6 temperature tra 300 e 1800 K. Sono, altresì inclusi i dati di scattering termico per acqua leggera, pesante e grafite.

Effetto Doppler

L'effetto Doppler viene tenuto in conto utilizzando le librerie di sezioni d'urto generate alla corretta temperatura del sistema in modo da modellizzare correttamente l'allargamento dei picchi di risonanza. Serpent prevede una routine di preprocessamento dell'effetto Doppler che permette di convertire le sezioni d'urto in formato ACE ad una temperatura più alta. Tale capacità consente una più accurata descrizione dell'interazione fisica nelle applicazioni sensibili alla temperatura se i dati delle sezioni d'urto sono disponibili solo in intervalli di 300 K. Se lo stesso nuclide viene valutato a diverse temperature in diversi materiali, vi è anche un incremento dell'utilizzo della memoria. Il metodo è stato validato ottenendo buoni risultati e, in aggiunta alla routine di preprocessamento, Serpent 2 permette di modificare la temperatura dei nuclidi durante la simulazione. Entrambe le metodologie sono attualmente limitate alle sezioni d'urto continue in energia e non coprono le tabelle delle probabilità delle risonanze non risolte o i dati di scattering $S(\alpha, \beta)$.

Nelle leggi delle reazioni ENDF dei dati in formato ACE vi è un difetto fisico per il quale viene ignorato l'impatto dell'agitazione termica sulla distribuzione angolare dello scattering elastico in prossimità delle risonanze. Il fenomeno diviene importante nei nuclidi pesanti ($A > 200$) con risonanze di scattering a bassa energia (< 0.2 keV), e può risultare in un'evidente sotto predizione delle risonanze d'assorbimento e sovra predizione del keff. Per correggere tale difetto, Serpent prevede l'applicazione di una correzione dell'allargamento Doppler (Doppler Broadening Rejection Correction) nel modello "free-gas" termico. Il metodo esegue un ciclo di campionamento delle sezioni d'urto di scattering a 0 Kelvin, i dati restituiti informano il codice su quali nuclidi dovrebbe essere utilizzata la correzione. Normalmente è sufficiente utilizzare il (DBRC) solo per i nuclidi primari più pesanti nel range energetico do-

vrebbe che copre i picchi a bassa risonanza. Un range tipico per U-238 è da 0.4 a 210 eV. Bisogna altresì sottolineare che:

- il metodo - incrementando la risonanza d'assorbimento – può ridurre K_{eff} di alcune centinaia di pcm;
- il metodo non è molto utilizzato da altri codici Monte Carlo, pertanto la correzione apportata può incrementare le differenze con altri risultati di riferimento;

2.3.5 Generazione delle costanti di gruppo

Le costanti di gruppo vengono generate sugli universi settati in input dall'utente. Gli universi in cui le costanti di gruppo sono calcolate possono essere definiti in input dall'utente secondo una precisa sintassi. L'omogeneizzazione viene realizzata negli universi specificati ed in tutti gli universi superiori accessibili dai reticoli e dalle celle riempite. I risultati vengono stampati in output utilizzando un differente indice per ogni universo elencato. Tutte le costanti di gruppo vengono create utilizzando la stessa struttura a pochi-gruppi. La struttura di default, modificabile dall'utente, è costituita da due gruppi energetici: un gruppo veloce sopra i 0.625 eV e un gruppo termico sotto tale valore.

Definizione delle sezioni d'urto di scattering

Nei codici di diffusione nodale vi sono alcune ambiguità sul modo in cui vengono definite le matrici di scattering da gruppo a gruppo e le sezioni d'urto di rimozione. La prima opzione disponibile è di scorporare il numero di neutroni prodotti e/o assorbiti in ogni reazione dalla reaction rates di scattering. In tal caso, la somma di ogni colonna della matrice eguaglia la sezione d'urto totale di scattering gruppo mediata:

$$\sum_{h=1}^G \sum_{s,g \rightarrow h} = \sum_{s,g} = \sum_{ela,g} + \sum_{2n,g} + \sum_{3n,g} + \dots = \sum_{tot,g} - \sum_{capt,g} - \sum_{fiss,g} \quad (2.27)$$

La seconda opzione è quella d'includere la produzione e/o assorbimento di neutroni nelle sezioni d'urto, in tal modo il prodotto del flusso di gruppo per la corrispondente sezione d'urto di trasferimento fornisce la velocità a cui i neutroni entrano nel gruppo h da reazioni di scattering nel gruppo g, considerando la moltiplicazione generata nelle reazioni (n,xn).

La definizione della matrice di scattering influenza anche la sezione d'urto di rimozione:

$$\sum_{rim,g} = \sum_{tot,g} - \sum_{s,g \rightarrow g} \quad (2.28)$$

dove è possibile indicare se la produzione di neutroni secondari viene o meno inclusa nella definizione. Il codice è stato dettagliatamente testato solo nei casi dove le costanti di gruppo sono omogeneizzate sull'intera geometria. Il calcolo può quindi fornire risultati incorretti per ciò che riguarda il valore dei coefficienti di diffusione e dei fattori di discontinuità di assembly se l'omogeneizzazione viene ristretta ad universi posti a livelli maggiori.

Cap. 3 – Il riflettore del reattore di ricerca RB3

3.1 Introduzione

Il reattore nucleare di ricerca dell'ENEA (Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie e lo Sviluppo Sostenibile) denominato RB3 (Reattore Bologna 3), ubicato nel Laboratorio d'Ingegneria Nucleare di Montecuccolino dell'Università degli Studi di Bologna, e' una facility sperimentale rimasta in esercizio per 19 anni (1971 -1989) con lo scopo di effettuare attività di ricerca e didattica in campo nucleare, in particolare studi relativi al combustibile previsto per il reattore CIRENE¹. Attualmente l'ENEA ne sta realizzando il decommissioning e prevede il rilascio incondizionato del sito entro la fine del 2015. La realizzazione di un calcolo di cella per questa facility sperimentale nasce dall'interesse di indagare la previsione che il codice di riferimento (SCALE 6.1.3) riesce a realizzare sul comportamento neutronico di un sistema reattore non convenzionale costituito da celle di combustibile di uranio naturale moderato ad acqua pesante e schermato da un massiccio riflettore in grafite. I calcoli realizzati forniscono altresì i valori del flusso neutronico in uscita dal sistema utili per eventuali verifiche in fase di decommissioning per il riflettore e lo Schermo Biologico in calcestruzzo armato baritico.

3.2 Caratteristiche tecniche e di funzionamento

Il reattore RB3 è stata una facility sperimentale praticamente a “potenza zero”, moderata ad acqua pesante con uno riflettore in grafite ed uno Schermo Biologico in calcestruzzo armato baritico. Il reattore, con l'obiettivo di realizzare misure di periodo o sottocritiche, è stato esercito per un totale di 1600 giornate lavorative effettive alla potenza nominale di 50 W_{th} e con solo 2000 ore di funzionamento alla massima potenza raggiungibile (100 W_{th}). Il dato stimato della fluenza neutronica massima prodotta in 19 anni d'esercizio risulta essere pari a $2.25 \cdot 10^{24} \text{ n/cm}^2$ paragonabile a quella presente nel canale centrale di un reattore di tipo TRIGA da 1 MW per un secondo di funzionamento. Il burn-up stimato per il massimo carico annuale è stato di qualche microgrammo di U^{235} all'anno, tale da considerare sempre “fresco” il combustibile impiegato nell'impianto.

Una delle possibili configurazioni di nocciolo era costituita da 60 elementi di combustibile di tipo ECO contenenti 19 barrette di uranio naturale – raggio fuel 0.6 cm, spessore clad 0.1 cm e altezza attiva 290 cm – raccolte in un fascio costituito da un reticolo esagonale a 3 anelli di passo 1.52 cm e racchiuse in tubi calandrati d'alluminio sigillati e contenenti elio di raggio interno pari a 3.84 cm e spessore pari a 0.15 cm. Le specifiche tecniche della geometria e dei materiali sono riportate in Fig.3.1, Tab. 3.1 e 3.2.

¹ CIRENE (CISE Reattore a Nebbia) era una filiera di reattori nucleare ad acqua pesante di concezione e realizzazione italiana sviluppato dal CISE (Centro Informazioni Studi ed Esperienze).

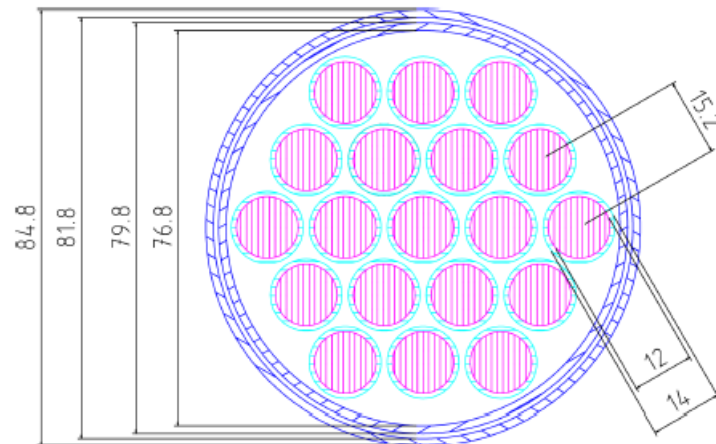


Figura 3.1: Dimensioni geometriche (mm) elemento di combustibile ECO-19

Tabella 3.1: Parametri fisici Uranio naturale

Uranio Naturale		
Parametro	Unità di misura	Valore
Densità	g/cm ³	19
²³⁴ U	w/o	0.0055
²³⁵ U		0.72
²³⁸ U		99.2745
Elio		
He	g/cm ³	0.0008

Tabella 3.2: parametri fisici lega d'Alluminio

Lega d'Alluminio		
Parametro	Unità di misura	Valore
Densità	g/cm ³	2.7
Al	w/o	95.25
Mg		3.90
Si		0.25
Fe		0.20
Zn		0.20
Cr		0.15
Cu		0.04
Mn		0.01

Il “vessel” del sistema era costituito da una tanca cilindrica in Alluminio – diametro 290 cm, spessore 0.6 cm ed altezza 434 cm – sovrastata da una struttura in acciaio per il sostegno degli elementi di combustibile e chiusa superiormente da un coperchio rotante in acciaio. Il nocciolo del reattore era centrato rispetto alla tanca, collocato nella parte inferiore ad un’altezza di circa 3 cm dal fondo e gli elementi di combustibile erano disposti al suo interno secondo un reticolo quadrato di passo pari a 27 cm. Il vessel era riempito con acqua pesante – con funzione di moderatore e di regolatore della criticità del sistema – ed era sovrastato da un plenum di circa 3 metri d’Azoto. All’esterno la tanca d’alluminio era circondata radialmente ed assialmente da un riflettore in grafite naturale di raggio interno pari a 150 cm, spessore radiale variabile tra 40 e 60 cm e spessore assiale di 70 cm.

La Fig. 3.2 riporta lo schema di disposizione degli elementi di combustibile ECO nel nocciolo (secondo la configurazione a 60 elementi) e le dimensioni geometriche del vessel.

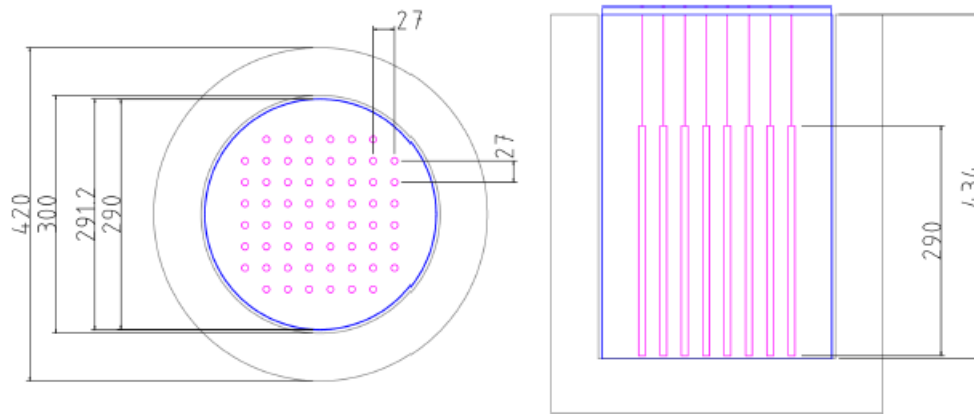


Figura 3.2: dimensioni geometriche del vessel e disposizione elementi di combustibile ECO nel nocciolo (cm)

La Tab. 3.3 riporta il valore della densità dei materiali costituenti il sistema esistente al di fuori degli elementi di combustibile.

Tabella 3.3: Parametri materiali del sistema RB3

Materiale	Parametro	Valore [g/cm ³]
D ₂ O	Densità	1.11
C-naturale		1.9
N ₂		0.001

La Fig. 3.3 riporta, in una rappresentazione geometrica in pianta, la sezione trasversale ottagonale del riflettore in grafite naturale².

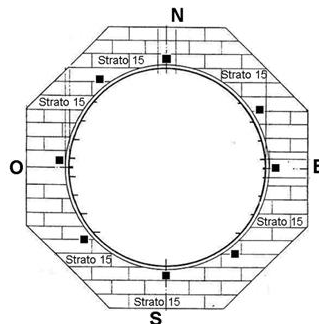


Figura 3.3: Sezione trasversale del riflettore in grafite

3.3 Calcoli neutronici

Il nocciolo del sistema RB3 era equipaggiato con un reticolo di cella elementare non convenzionale caratterizzato da un combustibile (U-nat metallico al 0.75 w/o), una disposizione di pin di combustibile ed un'azione moderante (D₂O) sostanzialmente diverse rispetto a quelli tipici un assembly di un LWR. Si è, quindi, deciso di verificare la risposta

² L'immagine è fornita da ENEA.

neutronica del codice di riferimento sia per la sola cella elementare con combustibile ECO-60 che per il sistema accoppiato cella elementare/riflettore.

3.3.1 Calcolo di cella

Il calcolo è stato realizzato sulla cella elementare con combustibile ECO-60 secondo le indicazioni geometriche e materiali presentate nel par. 6.2. Con l'obiettivo di realizzare un calcolo al contempo accurato ma computazionalmente non troppo oneroso, si è scelta una griglia computazionale di cella pari ad 80x80 mesh ed una griglia per le singole pin di combustibile pari ad 8x8 mesh. Nella Fig. 3.4 viene riportata la griglia computazionale e la disposizione dei materiali della cella per come visualizzati da SCALE 6.1.3.

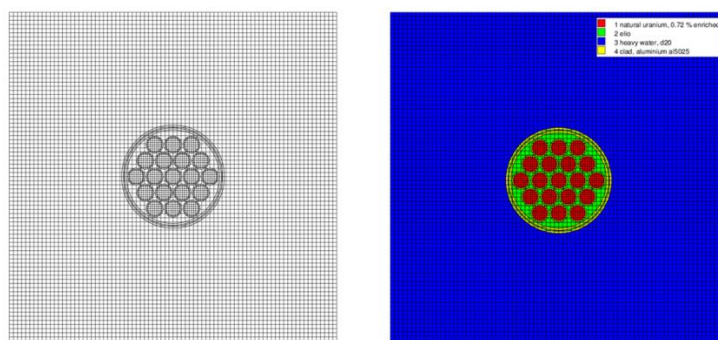


Figura 3.4: mesh computazionale e disposizione dei materiali - ECO-19

La zona del combustibile ha una dimensione complessiva circa 2,6 volte minore di quella di un assembly PWR, mentre la cella presenta un passo circa 1,2 volte maggiore; se a questo si aggiunge il fatto che ECO-60 utilizza un mezzo moderante (D_2O) che ha un rapporto di moderazione di due ordini di grandezza maggiore di quello dell'acqua utilizzata in un assembly PWR (27 cm), si può quindi prevedere che il sistema risulti essere, a differenza di un assembly PWR, complessivamente sovramoderato. La Tab. 3.4 riporta un confronto numerico dei rapporti di moderazione tra un assembly PWR 17x17 ed una cella elementare ECO-60 che giustifica le affermazioni precedenti.

Tabella 3.4: volumi combustibile e moderatore assembly PWR 17x17 e cella unitaria ECO-19

	Unità di misura	Assembly 17x17	ECO-60
passo	[cm]	21.505	27.00
volume moderatore	[cm ²]	258.48	672.52
volume combustibile	[cm ²]	154.49	21.49
Vm/Vc	[-]	1.67 ³	31.30

Tale circostanza comporta la presenza di forti gradienti di flusso termico che si mantengono tali dalla zona esterna di moderatore (l'acqua pesante occupa circa il 75% della

³ Il rapporto di moderazione dell'assembly 17x17 è, in realtà, leggermente sottostimato (-13%) perché si è assunto che tutte le celle elementari dell'assembly siano occupate dai soli elementi di combustibile.

superficie della cella) sino all'interno della zona di combustibile dove il flusso termico continua a diminuire (l'assenza di moderatore rende nullo il termine generativo dei neutroni termici dal downscattering dei neutroni veloci). Il comportamento del flusso veloce risulterà essere complementare prevedendo un andamento monotono decrescente dall'interno della zona di combustibile sino al contorno esterno della cella elementare.

Per la realizzazione del calcolo di autoschermo i moduli disponibili in SCALE non prevedono la possibilità di una modellizzazione esatta della cella ECO-60. Si è quindi dovuta realizzare una cella elementare "fittizia" che rappresentasse in maniera più fedele possibile il comportamento del sistema reale. Nello specifico, si è definita una cella elementare per l'autoschermo tale da conservare la massa di combustibile ed il volume della cella reale, spostando tutta la zona di vuoto (elio) alla periferia della cella stessa. La scelta è stata dettata dal fatto che le interzone di elio presenti tra le pin di combustibile della cella ECO-60 sono trasparenti ai neutroni e possono quindi essere tranquillamente concentrate alla periferia della cella senza che ciò alteri il comportamento neutronico del sistema. Nella Fig. 3.5 si riporta la cella elementare utilizzata per i calcoli di autoschermo e, per confronto, la cella elementare reale di ECO-60.

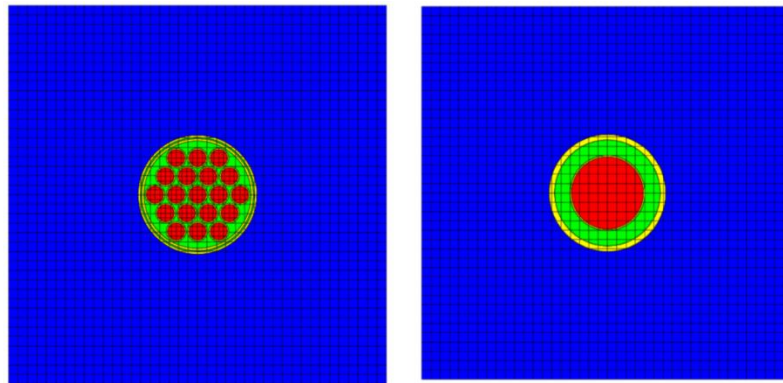


Figura 3.5: cella elementare ECO-19 (sx) e cella elementare per l'autoschermo (dx)

Il risultato ottenuto in termini di mappe di flusso vengono presentati nelle Fig. 3.6. Gli andamenti riscontrati confermano le considerazioni fisiche precedentemente esposte.

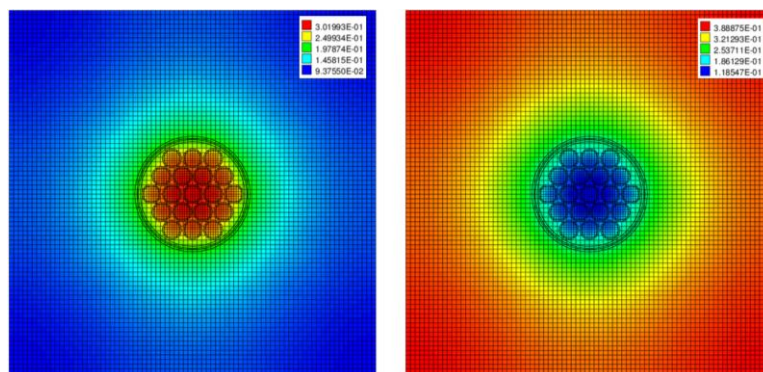


Figura 3.6: piani di flusso veloce e termico - ECO-19

Nella Fig. 3.7 si riporta l'andamento del flusso termico e di quello veloce per come restituito da SCALE 6.1.3 nella zona di mezzeria.

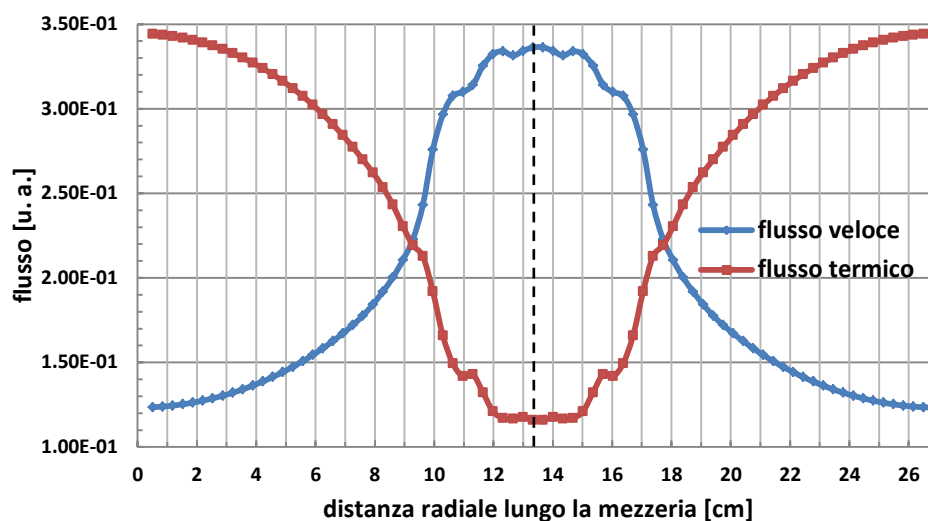


Figura 3.7: profilo di flusso termico e veloce nella zona di mezzeria cella ECO-19

In ultimo, per tale configurazione geometrica, si riportano i valori delle sezioni d'urto efficaci insieme con un loro confronto con quelle prodotte dall'assembly PWR TMI-1 (configurazione 15x15 arricchito in ^{235}U al 4.85 w/o e con 4 pin al gadolinio arricchite al 4.12 w/o) secondo le specifiche del benchmark .

Tabella 3.5: Sezioni d'urto efficaci ECO-19 e Assembly 15x15

	SCALE 6.1.3		
	ECO-19	Assembly 15x15	Var _{rel}
	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]
K_{eff}	1.22897	1.40954	-18057 pcm
Σ_{a1}	1.00E-02	1.01E-02	-1.16
Σ_{a2}	1.10E-01	1.11E-01	-0.94
Σ_{f1}	3.46E-03	3.49E-03	-0.86
Σ_{f2}	7.84E-02	7.93E-02	-1.08
Σ_{1→2}	1.66E-02	1.62E-02	2.68
Σ_{2→1}	1.65E-03	1.70E-03	-2.69
Σ_{tot1}	5.56E-01	5.54E-01	0.42
Σ_{tot2}	1.45E+00	1.44E+00	0.96
vΣ_{f1}	8.75E-03	8.83E-03	-0.92
vΣ_{f2}	1.91E-01	1.93E-01	-1.10
Σ_{tr1}	2.47E-01	2.25E-01	9.58
Σ_{tr2}	3.72E-01	9.42E-01	-60.5
D₁	1.35	1.48	-8.7
D₂	0.90	0.35	153.4

Le variazioni relative percentuali riportate in tabella sono calcolate rispetto alla configurazione di assembly 15x15 secondo la seguente relazione:

$$var_{rel} = \frac{ECO/19 - assembly_15x15}{assembly_15x15} * 100$$

come si osserva dalla Tab. 3.5 la variazione percentuale relativa più significativa è quella che si riferisce alle sezioni d'urto di trasporto per il gruppo termico e, quindi, al coefficiente di diffusione termico. Tale variazione è giustificabile col fatto che la cella elementare ECO ha un rapporto di moderazione (V_m/V_f) più di un ordine di grandezza maggiore rispetto all'assembly15x15 (Tab. 3.4); tale circostanza comporta che nel sistema ECO-19 i neutroni del gruppo termico abbiano mediamente una maggior diffusione rispetto a quelli del gruppo veloce. Nella Fig. 3.8 si riporta il confronto dei flussi critici per i due sistemi.

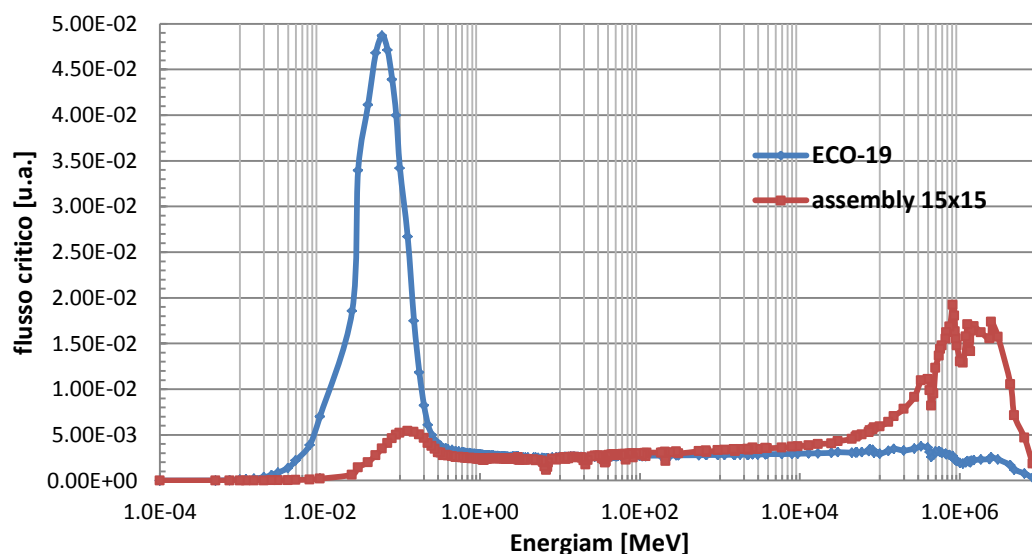


Figura 3.8: spettro critico RB3 e assembly PWR 15x15

In accordo con la condizione di forte sovramoderazione, lo spettro critico del sistema ECO-19 esibisce, rispetto ad un assembly PWR 15x15, un aumento della componente termica di circa un fattore 9. Lo “shift” verso le più alte energie del picco termico dell’assembly è coerente con le maggiori condizioni operative (+50 °C combustibile, +200 °C moderatore) utilizzate per l’assembly rispetto al sistema ECO-19.

3.3.2 Calcoli di riflettore

La modellizzazione radiale del sistema “cella-riflettore” è stata realizzata accoppiando ad un elemento di combustibile ECO-60 l’intera catena di elementi di schermaggio presenti nell’impianto RB3. Tale sistema è caratterizzato in direzione radiale da una successione di grafite, aria ed uno schermo biologico in calcestruzzo armato baritico. Le caratteristiche dimensionali medie del sistema riflettente sono riportate nella Tab. 3.6.

Tabella 3.6: Dimensioni medie sistema di schermaggio - RB3

Sistema di riflessione – RB3	
Strato	Spessore medio [cm]
Grafite	50
Aria	100
Calcestruzzo	50

La modellizzazione geometrica del sistema in riferimento alla distribuzione delle griglie computazionali e dei materiali è riportata nelle Fig. 3.9 e 3.10:

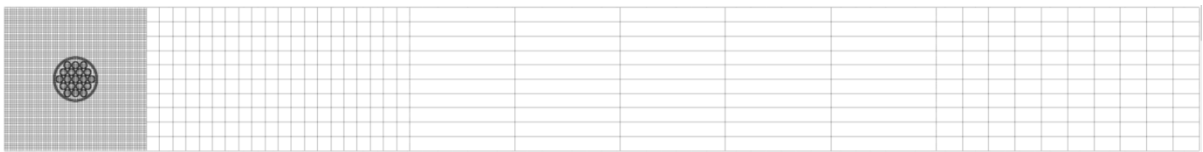


Figura 3.9: Mesh computazionale sistema cella-riflettore

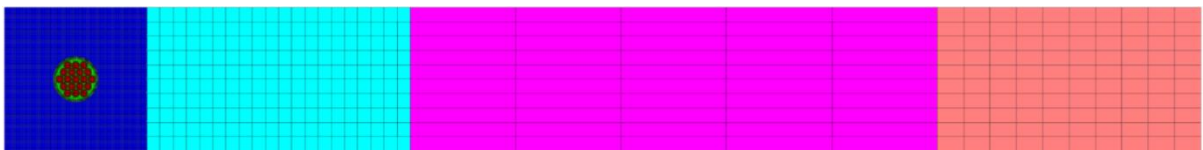


Figura 3.10: distribuzione dei materiali nel sistema cella-riflettore

La distribuzione delle mappe di flusso termico e veloce sono presentate nelle Fig. 3.11-12.

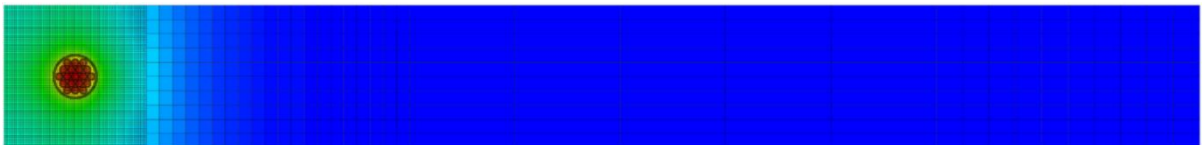


Figura 3.11: mappa di flusso veloce sistema cella-riflettore

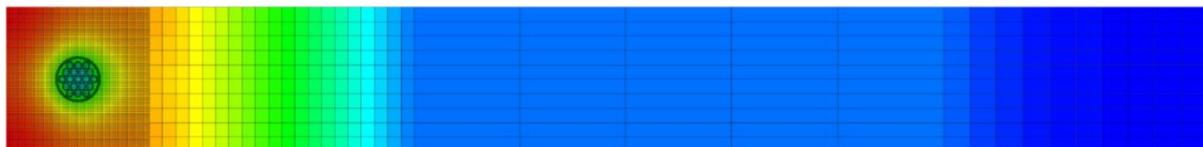


Figura 3.12: mappa di flusso termico sistema cella-riflettore

A seguire, per meglio evidenziarne la distribuzione energetica spaziale del flusso, si riporta un esploso delle mappe di flusso del sistema cella-riflettore per la sola zona in cui è presente un significativo gradiente di flusso neutronico (zona cella - grafite).

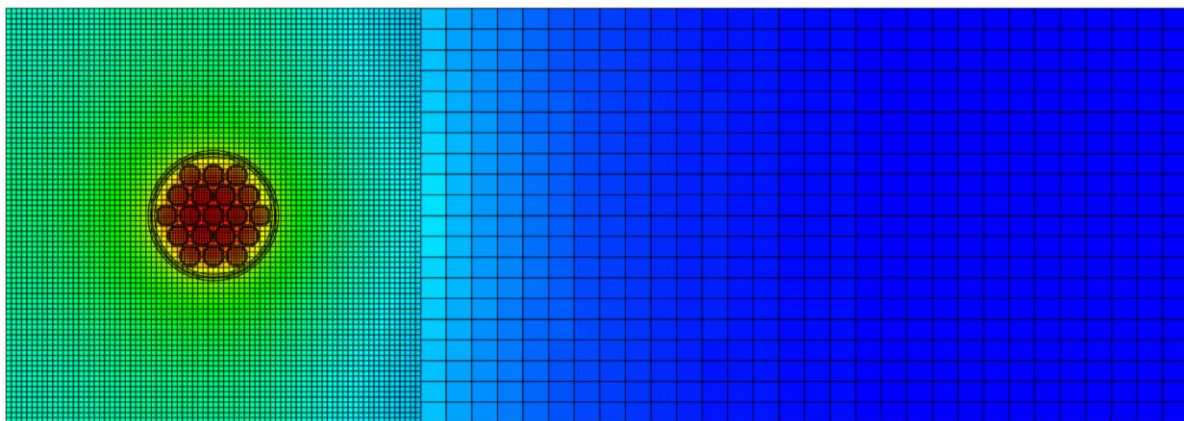


Figura 3.13: mappa di flusso veloce zona cella-grafite

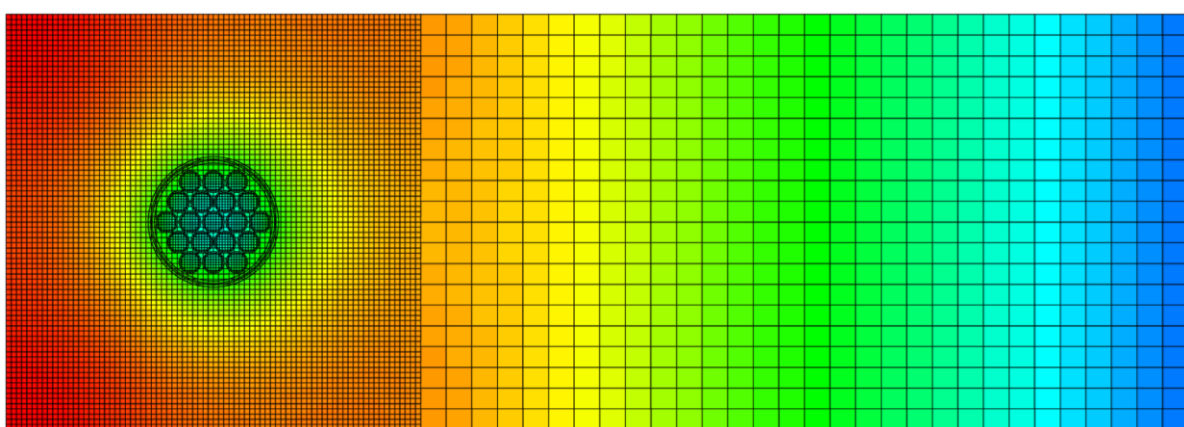


Figura 3.14: mappa di flusso termico zona cella-grafite

Le Fig. 3.15-17 riportano l'andamento dei flussi – termici e veloci – nella zona della sola cella ECO-19 ed in tutto il sistema cella-riflettore.

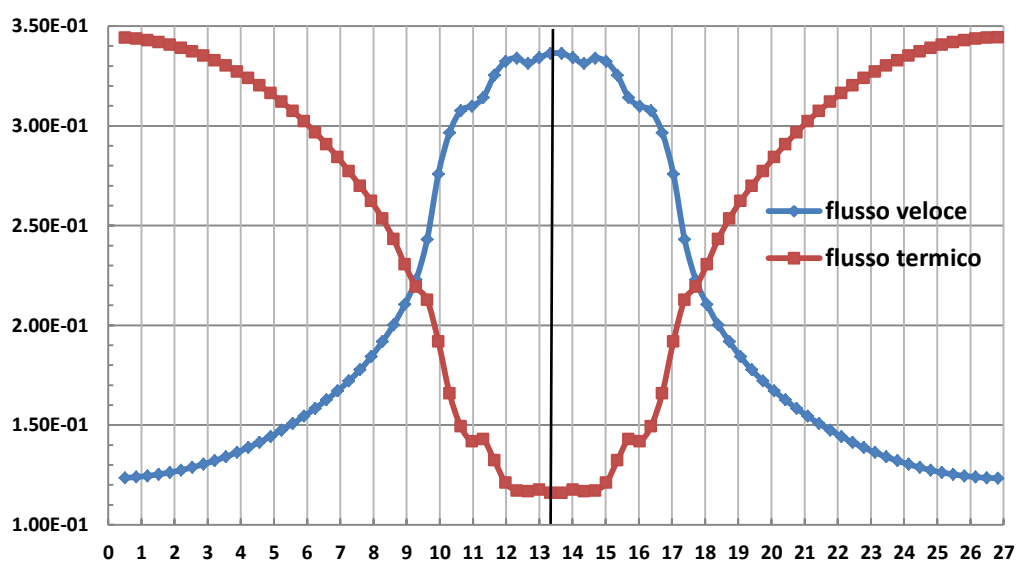
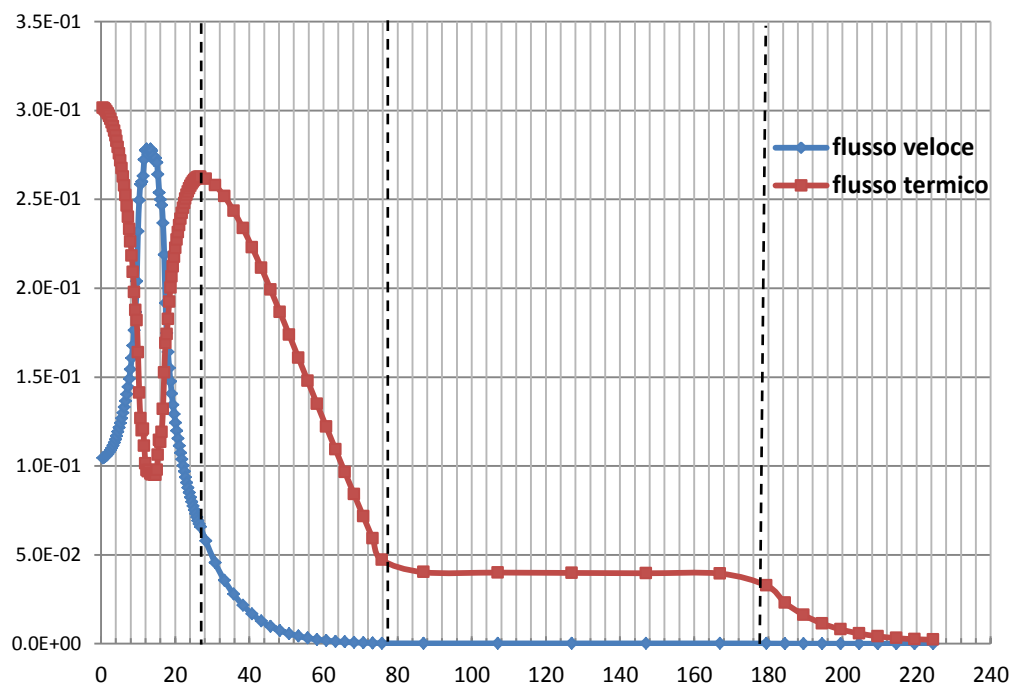
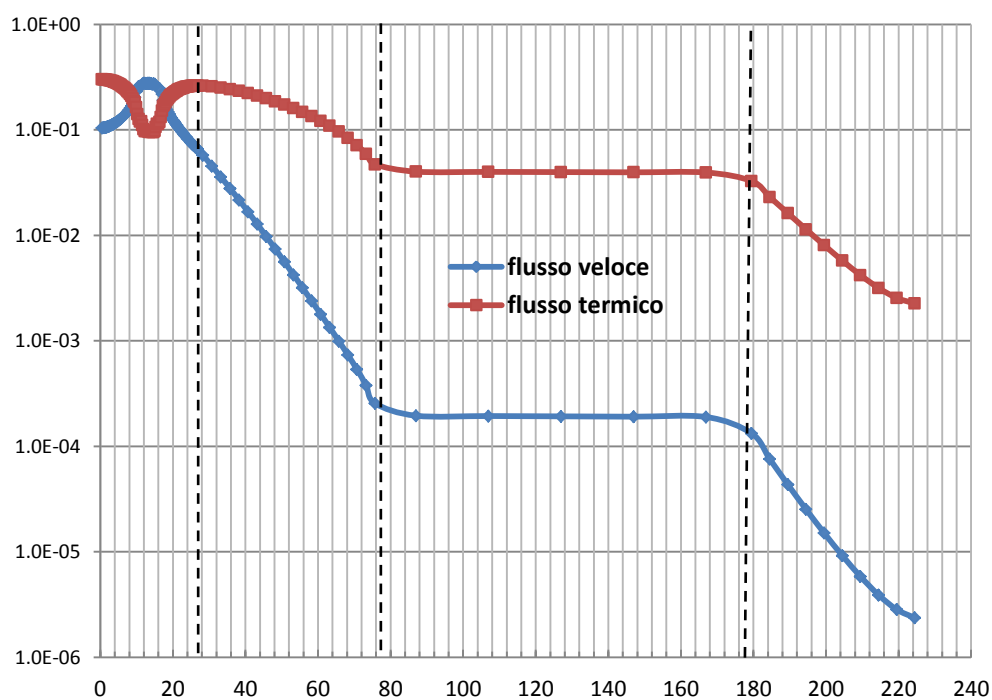


Figura 3.15: profilo di flusso termico e veloce cella ECO-19


 Figura 3.16: profili di flusso termico e veloce sistema cella-riflettore (*lin/lin*)

 Figura 3.17: profili di flusso termico e veloce sistema cella-riflettore (*log/lin*)

In ultimo, si riportano i valori di sezioni d'urto efficaci ricavati con SCALE 6.1.3 per la zona della cella elementare e per le tre zone del sistema di riflessione.

Tabella 3.7: sezioni d'urto efficaci sistema ECO-19/riflettore

	SCALE 6.1.3			
	[het/het]			
	Cella	Grafite	Aria	Calcestrusso
	ECO-19			Baritico
	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]
K_{eff}	0.94675			
Σ_{a1}	1.65E-03	2.24E-05	4.06E-06	6.90E-04
Σ_{a2}	3.57E-03	3.33E-04	6.55E-05	7.72E-03
Σ_{f1}	4.67E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Σ_{f2}	1.85E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Σ_{1→2}	8.29E-03	9.28E-03	9.67E-06	2.60E-02
Σ_{2→1}	3.94E-05	2.35E-05	2.06E-09	9.97E-07
Σ_{tot1}	3.15E-01	5.25E-01	3.77E-04	4.15E-01
Σ_{tot2}	4.31E-01	5.56E-01	5.13E-04	6.85E-01
vΣ_{f1}	1.26E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
vΣ_{f2}	4.50E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Σ_{tr1}	2.46E-01	4.71E-01	2.75E-04	2.77E-01
Σ_{tr2}	3.71E-01	5.56E-01	4.88E-04	5.65E-01
D₁	1.357	0.708	1212	1.202
D₂	0.899	0.600	683	0.590
φ₁	1.15E-01	1.23E-02	1.47E-04	2.51E-05
φ₂	2.63E-01	1.64E-01	3.47E-02	9.26E-03

Cap. 4 – Il riflettore dell'unità PWR TMI-I

4.1 Introduzione

La necessità di eseguire una valutazione preliminare della tipologia di descrizione geometrica da utilizzare per la zona di riflettore (omogenea od eterogenea) ed il desiderio di poter confrontare i risultati ottenibili con quelli disponibili da calcoli con altri codici di riferimento, ha comportato la scelta di realizzare calcoli di sezioni d'urto efficaci su un sistema per il quale fossero potenzialmente disponibili dati di confronto. Si è pertanto deciso di realizzare il calcolo delle costanti di gruppo della zona assembly-riflettore secondo le specifiche tecniche riportate nel benchmark NEA/NSC/DOC/(2013)7. Il calcolo delle sezioni d'urto efficaci è stato realizzato sia per una geometria bidimensionale omogeneizzata che per una esatta. Si è inoltre effettuata un'analisi di sensitività per indagare l'effetto della concentrazione di boro nel moderatore sul risultato finale. Le stime ottenute col codice di riferimento (SCALE 6.1.3) sono state confrontate con quelle acquisite col codice SERPENT 2.0 e con quelle presenti in letteratura (MCNP5, DRAGON). Al momento della realizzazione delle simulazioni risultavano essere disponibili i dati delle costanti di gruppo del benchmark riguardanti il solo assembly riflesso del sistema TMI-1; per quest'ultimo sistema è stata quindi fatta un'analisi di consistenza neutronica per comparare i risultati del benchmark con quelli ottenuti con SCALE 6.1.3, col codice Monte Carlo MCNPX e con Serpent 2.0. Una sintesi di tutti i risultati conseguiti è stata presentata come poster alla conferenza Internazionale NENE-2014 svoltasi a Portoròz (Slovenia) nel settembre 2014.

4.2 Il Benchmark NEA-NSC-DOC(2013)7

Il benchmark NEA-NSC-DOC(2013)7 si pone l'obiettivo di effettuare un'analisi delle diverse tipologie d'incertezza che sorgono nei calcoli sui reattori nucleari ad acqua leggera (PWR, BWR, VVER-1000, ecc.) proponendo una serie di esercizi definiti con precisione dal punto di vista geometrico, dei materiali e cinetico. Nello specifico, il benchmark propone di realizzare un'analisi d'incertezza delle diverse fasi di calcolo di un sistema reattore (neutronica, termoidraulica e neutronica-termoidraulica) attraverso l'esecuzione di un'analisi di sensitività su specifici parametri fisici di sistema. La fase neutronica, di interesse in questo lavoro di tesi, consta di tre tipologie di esercizi:

1. Esercizio I-1 “*Fisica della cella*”: l'obiettivo è la valutazione delle incertezze dovute ai dati nucleari, l'impatto nel processamento dei dati nucleari e di covarianza, la selezione delle strutture multigruppo e il trattamento di autoschermo;
2. Esercizio I-2 “*Fisica del reticolo*”: l'obiettivo è la valutazione della propagazione delle incertezze nei sistemi reticolari dovute alle sezioni d'urto multigruppo, ai metodi e modelli di approssimazione utilizzati nei codici di “lattice” e alla realizzazione degli assemblies;

3. Esercizio I-3 “*Fisica del nocciolo*”: l'obiettivo è la valutazione delle incertezze nei parametri fisici del nocciolo (reattività, distribuzione di potenza, worth di reattività) dovuta all'incertezza nei dati di sezioni d'urto di reticolo omogeneizzate e condensate a pochi gruppi, nelle approssimazioni del modello per la soluzione dell'equazione del trasporto, nelle semplificazioni numeriche e nelle variazioni della geometria.

Il benchmark UAM (Uncertainty Analysis in Modeling) offre la possibilità di utilizzare una serie di possibili scenari di calcolo per diverse tipologie di reattori nucleari. Nello specifico, vengono proposte le seguenti configurazioni reattoristiche: l'unità 6 della centrale nucleare Kozloduy di tipo VVER-1000 con una potenza nominale di 1906 MWe, l'unità 2 della centrale nucleare di Peach Bottom 2 (PB-2) di tipo BWR-Mark I con una potenza nominale pari a 1112 MWe e l'unità 1 della centrale nucleare di Three Mile Island (TMI-1) di tipo PWR con una potenza nominale pari a 906 MWe.

L'obiettivo finale della tesi era la realizzazione di un accurato calcolo di sezioni d'urto efficaci per la zona del riflettore di un sistema EPR-like. Si è pertanto deciso di utilizzare la configurazione più prossima ad un sistema EPR, ossia la TMI-1 con condizioni al contorno miste di riflessione e di vuoto; tale configurazione veniva presentata e descritta nel dettaglio all'interno dell'esercizio I-2 del benchmark.

4.3 Descrizione della geometria e dei materiali

Le specifiche tecniche della geometria e dei materiali del sistema assembly-riflettore analizzato sono state scelte secondo quanto riportato nel benchmark di riferimento. A seguire, si riportano i dettagli numerici dei dati utilizzati per costruire la pin di combustibile, il tubo guida, il tubo strumentale e l'assembly 15x15.

Cella elementare di combustibile – UO_2

Tabella 4.1: Parametri fisici e geometrici cella di UO_2

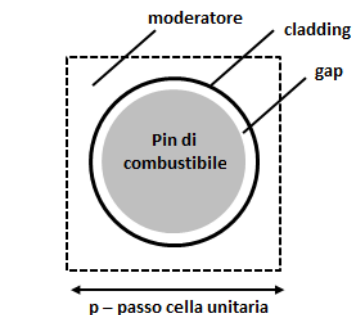


Figura 4.1: Cella di combustibile

Parametro geometrico	Unità di misura	Valore
Passo della cella	[mm]	14.427
Diametro della fuel pellet	[mm]	9.391
Diametro esterno cladding	[mm]	10.928
Diametro interno cladding	[mm]	9.582
Composizione della fuel pellet	[-]	UO_2
Densità del combustibile	$[\text{g}/\text{cm}^3]$	10.283
Arricchimento	w/o	4.85
Composizione del cladding	[-]	Zircaloy-4
Densità del cladding	$[\text{g}/\text{cm}^3]$	6.55
Composizione del gap	[-]	He
Materiale del moderatore	[-]	H_2O

Cella elementare di combustibile - $UO_2 + Gd_2O_3$

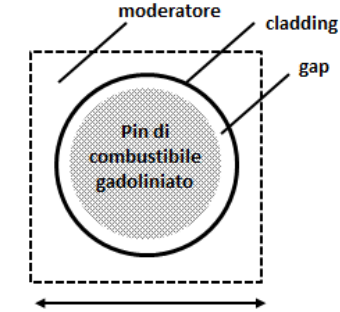


Figura 4.2: Cella di combustibile

Tabella 4.2: Parametri fisici e geometrici cella di $UO_2 + Gd_2O_3$

Parametro geometrico	Unità di misura	Valore
Passo della cella	[mm]	14.427
Diametro della fuel pellet	[mm]	9.391
Diametro esterno cladding	[mm]	10.928
Diametro interno cladding	[mm]	9.582
Composizione della fuel pellet	[-]	$UO_2 + Gd_2O_3$
Densità del combustibile	[g/cm ³]	10.144
Concentrazione di Gd_2O_3	[wt %]	2
Arricchimento	[w/o]	4.12
Composizione del cladding	[-]	Zircaloy-4
Densità del cladding	[g/cm ³]	6.55
Composizione del gap	[-]	He
Materiale del moderatore	[-]	H ₂ O

Cella elementare del tubo guida

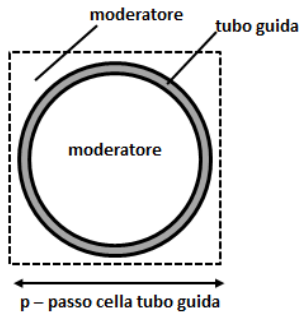


Figura 4.3: Cella tubo guida

Tabella 4.3: Parametri fisici e geometrici tubo guida

Parametro	Unità di misura	Valore
Passo della cella	[mm]	14.427
Diametro esterno tubo guida	[mm]	13.462
Diametro interno tubo guida	[mm]	12.649
Composizione tubo guida	[-]	Zircaloy-4
Composizione moderatore	[-]	H ₂ O

Cella elementare del tubo strumentale

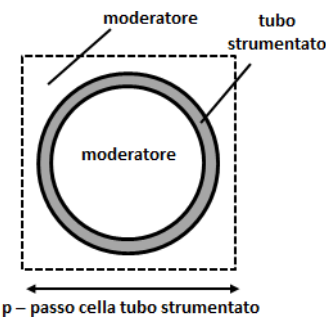


Figura 4.4 Cella tubo strumentato

Tabella 4.4: Parametri fisici e geometrici tubo strumentato

Parametro	Unità di misura	Valore
Passo della cella	[mm]	14.427
Diametro est. tubo strumentato	[mm]	12.522
Diametro int. tubo strumentato	[mm]	11.201
Composizione tubo guida	[-]	Zircaloy-4
Composizione moderatore	[-]	H ₂ O

La composizione isotopica utilizzata per modellizzare lo Zircalloy-4 è la seguente:

Tabella 4.5: Composizione massica Zircalloy-4

Composizione	Nuclide				
	O	Cr	Fe	Zr	Sn
[wt %]	0.125	0.100	0.210	98.115	1.450

Assembly PWR TMI-1

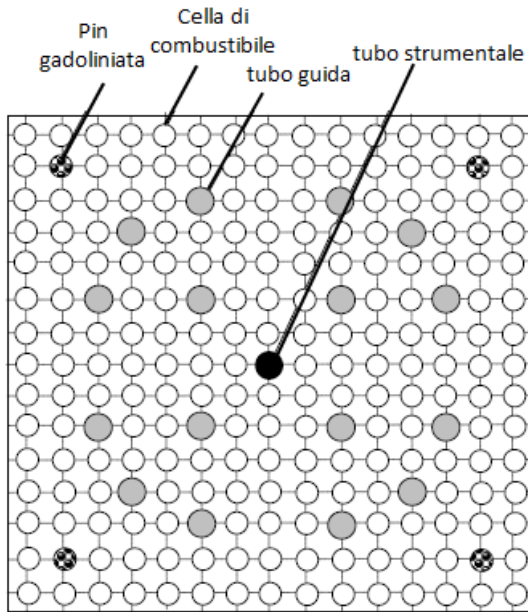


Figura 4.5: Assembly PWR 15x15 TMI-I

Tabella 4.6: Geometria assembly 15x15 PWR TMI-I

Parametro	Unità di misura	Valore
Dimensioni assembly	[-]	15x15
Barre di combustibile	[-]	208
Numero di tubi guida	[-]	16
Numero di tubi strumentali	[-]	1
Numero di pin Gadolinate	[-]	4
Passo dell'assembly	[mm]	218.110
Gap tra gli assembly	[mm]	1.702

Sistema assembly-riflettore TMI-1

Tabella 4.7: Geometria e materiali assembly/riflettore TMI-I

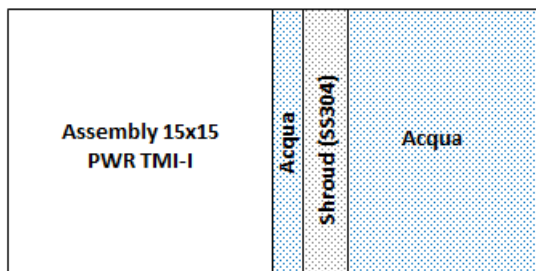


Figura 4.6: Sistema assembly/riflettore TMI-I

Parametro	Unità di misura	Valore
Passo assembly	[mm]	216.41
Passo riflettore	[mm]	216.41
Lunghezza slab di acqua	[mm]	2.1
Lunghezza shroud	[mm]	19.1
Lungh. acqua zona riflettore	[-]	4
Composizione shroud	[-]	SS304s
Densità shroud	[g/cm ³]	8.03

Le composizioni massiche utilizzate per modellizzare l'acqua e l'acciaio sono le seguenti:

Tabella 4.8: composizione massica acqua ed acciaio

Composizione	Acqua		Acciaio (SS304s)								
	H	O	¹² C	⁵⁵ Mn	³¹ P	³² S	²⁹ Si	⁵² Cr	⁵⁸ Ni	¹⁴ Ni	⁵⁶ Fe
[wt %]	11.19	88.81	0.08	2.00	0.05	0.03	0.75	20.00	12.00	0.10	64.99

I calcoli si sono realizzati alle condizioni di potenza nulla (HZP) per le quali il benchmark prevedeva una densità del moderatore pari a 766 kg/cm^3 e valori di temperatura per come riportati nella Tab. 5.9:

Tabella 4.9: condizioni operative del sistema assembly-riflettore PWR TMI-I

Condizione operativa HZP		
Combustibile	Cladding	Moderatore
[K]	[K]	[K]
551	551	551

4.4 Metodologia

Il calcolo delle sezioni d'urto efficaci condensate a due gruppi è stato realizzato secondo tre diverse tipologie di sistemi:

1. *[het/het]*: sistema geometrico eterogeneo (assembly, shroud e acqua) e valutazione delle sezioni d'urto eterogenee (assembly, shroud, acqua);
2. *[het/hom]*: sistema geometrico eterogeneo (assembly, shroud e acqua) e valutazione delle sezioni d'urto omogenee (assembly, riflettore);
3. *[hom/hom]*: sistema geometrico omogeneo (assembly, riflettore) e valutazione delle sezioni d'urto omogenee (assembly, riflettore);

Il secondo sistema *[het/hom]* è quello che restituisce dati di cella utili per i successivi calcoli di nocciolo; il primo sistema è stato studiato per comprendere con maggior dettaglio la fisica del riflettore, mentre il terzo caso è stato analizzato per verificare quanto l'approssimazione di omogeneizzazione geometrica preliminare del sistema influenzasse il risultato finale del calcolo.

4.4.1 Codice deterministico – T-NEWT

Il calcolo deterministico è stato realizzato col modulo T-NEWT utilizzando l'opzione CEN-TRM per il processamento delle sezioni d'urto. Le librerie di lavoro adoperate sono le v7-238 che, dopo l'esecuzione del calcolo di trasporto, sono state collassate a due gruppi secondo i seguenti intervalli energetici:

Tabella 4.10: Struttura a due gruppi delle v7-238

Collassamento sezioni d'urto v7-238		
Energia	g	Gruppo
[eV]	[-]	[-]
2.000E+07	1	veloce
6.250E+01		
6.250E+01	2	termico
1.000E-05		

L'ordine di quadratura (S_n) e quello di scattering (P_n) sono stati rispettivamente posti pari a 16 ed a 1 (fatta eccezione per il moderatore il cui ordine di quadratura è stato posto uguale a 2 secondo quanto previsto dalla documentazione tecnica a supporto di SCALE 6.1.3). Il calcolo, dopo un'analisi preliminare sull'accettabilità dei tempi rispetto all'accuratezza del risultato, è stato eseguito utilizzando un criterio di convergenza che prevede un errore relativo massimo pari a 10^{-5} per il keff e a 10^{-4} per la convergenza spaziale del flusso (iterazioni interne ed esterne). Nel calcolo di trasporto, sempre seguendo le indicazioni presenti nella documentazione prodotta per SCALE 6.1.3, il numero di anelli concentrici utilizzati per la discretizzazione spaziale delle pin di combustibile è stato posto pari a cinque per le pin gadolinate e ad uno per il combustibile ad UO_2 . Lo spettro critico è stato ottenuto con l'approssimazione B_1 ed i coefficienti di diffusione sono stati calcolati come un terzo dell'inverso della sezione d'urto macroscopica di trasporto. La griglia computazionale per la cella unitaria (combustibile, tubo guida e tubo strumentale) è stata posta pari a 16 (4 nella direzione x e 4 nella direzione y); quella per l'assembly è stata posta pari a 225 (15 nella direzione x e 15 nella direzione y). Nella zona dello Shroud si sono realizzate 96 mesh (6 nella direzione x e 16 nella direzione y); per la zona d'acqua del riflettore le mesh utilizzate sono state 720 (45 nella direzione x e 16 nella direzione y). Infine, nella geometria si è altresì considerata la presenza della lamina d'acqua che circonda l'assembly. Nella Tab. 4.11 si riassumono le opzioni di calcolo utilizzate:

Tabella 4.11: Opzioni di calcolo utilizzate in T-NEWT

Opzione	Note	Valore
Librerie di sezioni d'urto	-	v7-238
Processamento delle Xs	Modulo	CENTRM
S_n	-	16
P_n	-	1
P_n	Acqua	2
Discretizzazione spaziale combustibile	UO_2	1
Discretizzazione spaziale combustibile	$\text{UO}_2+\text{Gd}_2\text{O}_3$	5
Spettro critico	-	B_1
Mesh cella elementare	4x4	96
Mesh Assembly	15x15	225
Mesh shroud	6x16	96
Mesh zona acqua riflettore	45x16	720
Convergenza	K	10^{-5}
Convergenza	It. interne	10^{-4}
Convergenza	It. esterne	10^{-4}

Nella Fig. 4.7 si riporta la rappresentazione grafica della griglia computazionale e della distribuzione dei materiali per come realizzata in output da T-NEWT.

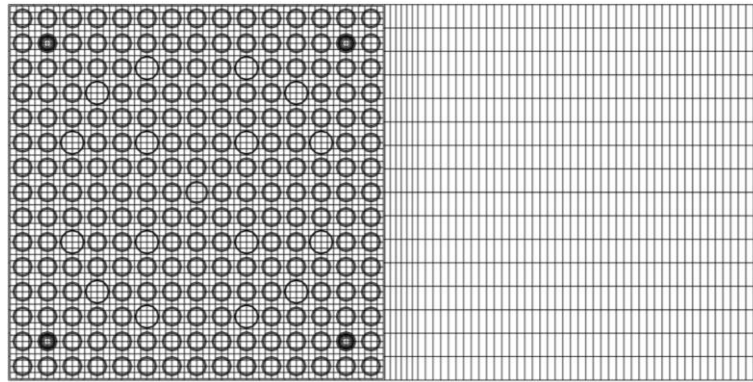


Figura 4.7: Griglia computazionale - assembly/riflettore PWR TMI-I

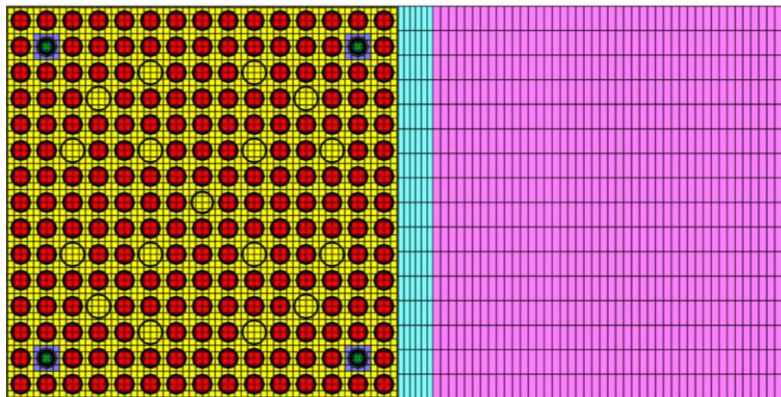


Figura 4.8: Disposizione dei materiali - assembly/riflettore PWR TMI-I

4.4.2 Codice Monte Carlo – Serpent 2.0

Il codice Monte Carlo SERPENT 2.0 è stato utilizzato con le librerie ENDF/B-VII scelte alla temperatura di 600 K, valore quest'ultimo il più vicino possibile a quello suggerito dal benchmark (551 K). Le sezioni d'urto sono state collassate in una struttura a due gruppi: un gruppo termico sotto i 0.625 eV ed un gruppo veloce sopra tale valore. La geometria utilizzata è un cubo al cui interno sono stati inclusi due sistemi assembly-riflettore posti in parallelo.

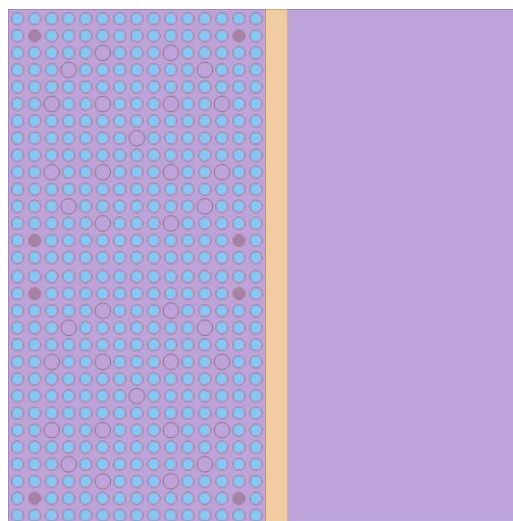


Figura 4.9: Rappresentazione geometrica assembly-riflettore TMI-1 - Serpente 2.0

La scelta di realizzare una geometria diversa dalla reale configurazione del sistema si è resa necessaria a causa delle attuali limitazioni presenti nel codice. In particolare, SERPENT non permette l'utilizzo di condizioni al contorno di riflessione su geometrie rettangolari – quale quella rettangolare del sistema assembly-riflettore – ma solo su geometrie quadrate, cilindriche esagonali e cubiche; inoltre il codice non permette l'utilizzo di condizioni al contorno miste (ad es. di riflessione e vuoto) nella stessa direzione. Tali problematiche sono state superate utilizzando condizioni al contorno di riflessione su tutto il dominio e, per poter simulare la condizione di vuoto, si è artificialmente introdotto all'estremità destra del riflettore uno slab di gadolinio puro le cui caratteristiche fisico-geometriche sono state scelte in modo tale che fosse altamente efficace nell'assorbire tutti i neutroni termici (Gd-157 ad alta densità) senza al contempo modificare la configurazione neutronica del sistema (1 mm di spessore). La Figura 4.9 riportata precedentemente visualizza la geometria per come realizzata dal codice SERPENT 2.0.

4.5 Risultati

Si è effettuato un calcolo preliminare del fattore di moltiplicazione effettivo col codice MCNPX 2.7.0 con l'obiettivo di verificare la consistenza della risposta neutronica di SERPENT 2.0 sul sistema PWR TMI-I del benchmark. Per far ciò, si è realizzata una geometria del tutto identica a quella proposta dal benchmark per come visualizzato in Fig. 4.10.

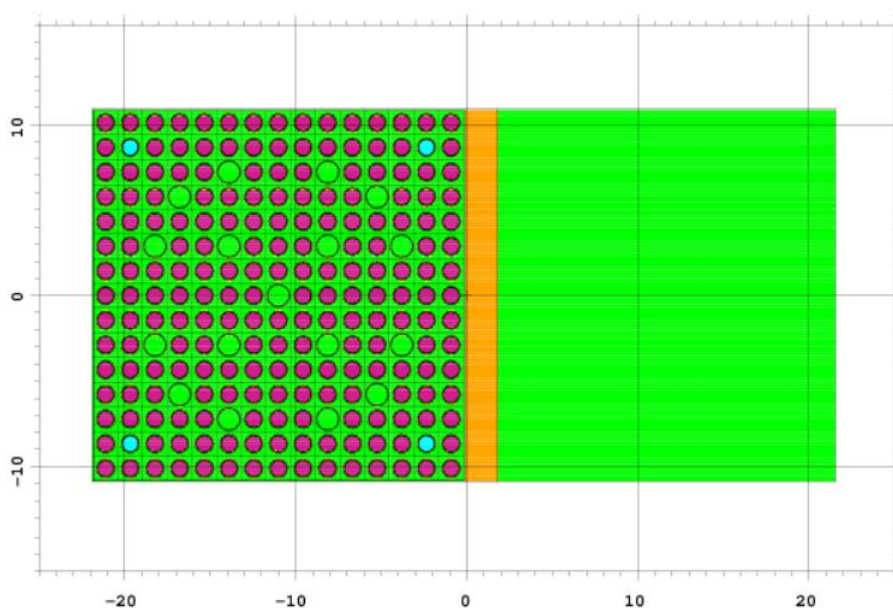


Figura 4.10: Geometria assembly-riflettore MCNPX

Le librerie di sezioni d'urto utilizzate sono le ENDF/B-VII (Release 1) con dati di reazione alla temperatura di 600 K. I dati di scattering termico scelti per il trattamento del moderatore sono quelli della libreria lwtr.16t. La simulazione è stata realizzata con 650 cicli (saltando i primi 50) e con una popolazione neutronica di $5E+05$ particelle per ciclo. Sono state utilizzate condizioni al contorno misto di riflessione e vuoto. Nella Tab. 4.12 si riporta il confronto dei

risultati ottenuti con i tre codici sul coefficiente di moltiplicazione effettivo ottenuti con i tre codici.

Tabella 4.12: Coefficiente di moltiplicazione effettivo per il caso [het/het]

	SCALE 6.1.3	MCNPX 2.7.0	SERPENT 2.1.0
K_{eff}	1.22923	1.22873 ± 0.00005	1.23362 ± 0.00007

Al risultato restituito dai codici Monte Carlo è associato un valore di deviazione standard pari ad un sigma. Il risultato considerabile pressoché equivalente espresso da MCNPX e da SCALE ($\Delta k = +50 \text{ pcm}$) conferma la validità della scelta di SCALE 6.1.3 come codice di riferimento per effettuare i calcoli di cella; al contrario, la non trascurabile differenza assoluta ($\Delta k = +489 \text{ pcm}$) tra il valore del coefficiente di moltiplicazione effettivo determinato da SERPENT 2.0 e quello calcolato da SCALE 6.1.3 è probabilmente dovuta sia alla presenza del gadolinio sia alle attuali limitazioni che il codice presenta nella simulazione di sistemi diversi da quelli costituiti da semplici celle reticolari riflesse.

Allo scopo di verificare il comportamento neutronico puntuale, si è al contempo determinato l'andamento del profilo di flusso termico e veloce su tutto il dominio del sistema assembly-riflettore. La Fig. 4.13 riporta i profili di flusso nella zona di mezzeria del sistema per come ottenuti con SCALE 6.1.3.

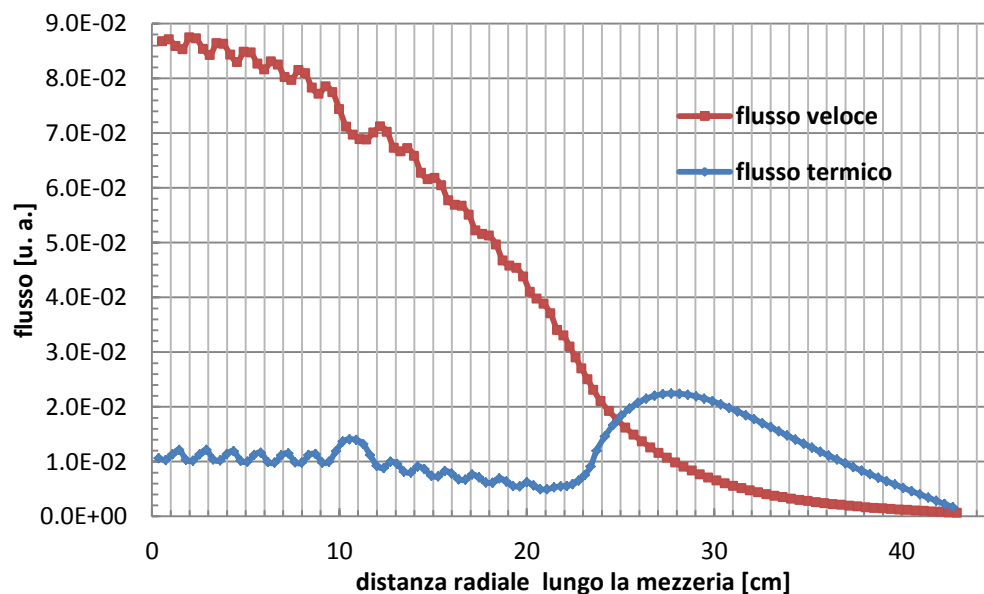


Figura 4.11: profili di flusso termico e veloce lungo la mezzeria - SCALE 6.1.3

L'andamento trovato dei profili di flusso termico e veloce si conforma a quello tipico di un sistema assembly-riflettore in cui, nella zona di riflessione, si assiste ad un incremento del flusso termico dovuto al termine generativo proveniente dallo scattering dei neutroni veloci in zona termica. Il flusso termico aumenta sino a quando la reaction rate di generazione di nuovi neutroni viene eguagliata dalla reaction rate di assorbimento degli stessi; oltre tale punto si assiste ad una predominanza delle fughe con una conseguente diminuzione del flusso con continuità sino all'estremità destra del riflettore. Lo stretto intervallo di mesh compu-

tazionali utilizzato nel calcolo permette di apprezzare la configurazione eterogenea del sistema costituita da un alternarsi di zone di fissione (celle di combustibile) con zone di moderazione (interspazio tra celle contigue); è inoltre chiaramente visibile l'effetto del tubo strumentale centrale sull'andamento del flusso neutronico. La linea nera rappresenta la zona di demarcazione tra l'assembly ed il riflettore.

La distribuzione spaziale bidimensionale del flusso neutronico viene riportata nelle Fig. 4.14-16 in termini di mappe di flusso termico e veloce per come determinate dai codici SERPENT 2.0 e SCALE 6.1.3.

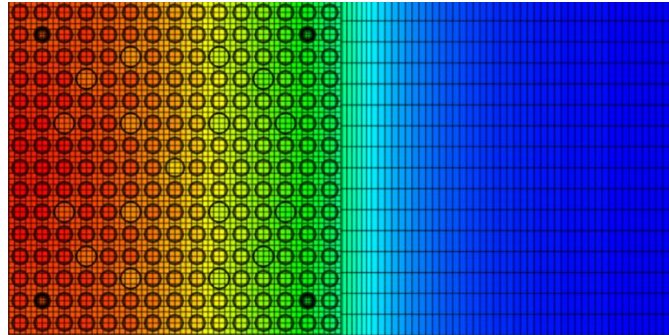


Figura 4.12: mappa di flusso veloce - SCALE 6.1.3

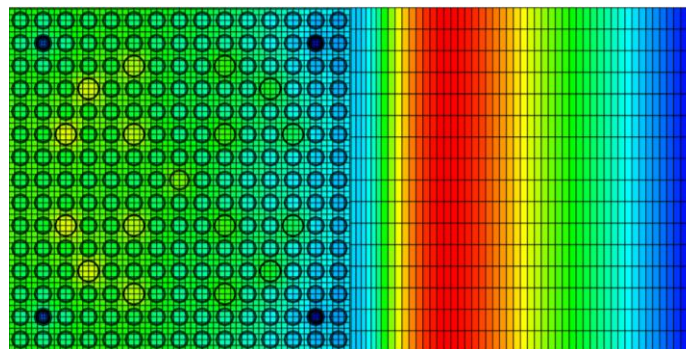


Figura 4.13: mappa di flusso termico - SCALE 6.1.3

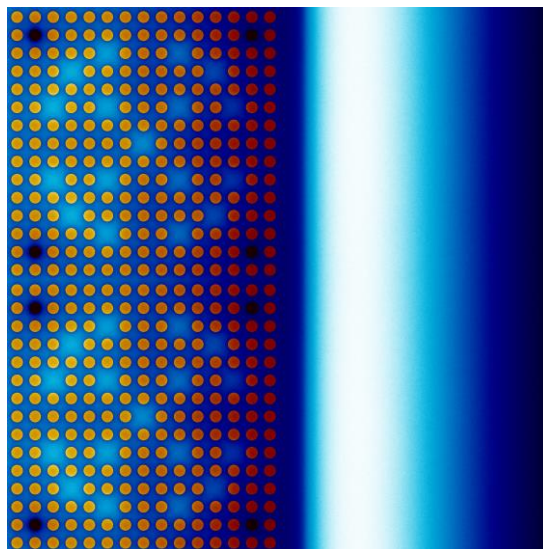


Figura 4.14: Mappa di flusso termico - Serpent 2.0

Gli andamenti del flusso sono risultati essere pienamente in accordo tra i due codici. Nel prosieguo vengono riportati i risultati numerici ottenuti nel calcolo delle sezioni d'urto efficaci condensate a due gruppi $[\text{cm}^{-1}]$. Nello specifico, la Tab. 4.13 riporta il risultato del calcolo delle costanti di gruppo in configurazione $[\text{het}/\text{hom}]$ per come ottenute da SCALE 6.1.3 E SERPENT 2.0. La variazione relativa (Var_{rel}) riportata in ciascuna delle Tab. 4.14 e 4.15 è stata calcolata utilizzando come riferimento i valori di SCALE 6.1.3 posti nella prima colonna.

Tabella 4.13: Risultati ottenuti con SCALE 6.1.3 e SERPENT 2.0

	SCALE 6.1.3		SERPENT 2.1.0				
	[het/hom]		[het/hom]				
	Assembly	Riflettore	Assembly	σ	Riflettore	σ	Var _{rel}
	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]
K _{eff}	1.22897		1.23380±0.0009				-483 pcm
Σ _{a1}	1.00E-02	1.68E-03	1.02E-02	8.00E-05	1.75E-03	4.50E-04	1.96
Σ _{a2}	1.10E-01	1.71E-02	1.08E-01	7.00E-05	1.71E-02	1.50E-04	-1.85
Σ _{f1}	3.46E-03	0.00E+00	3.50E-03	8.00E-05	0.00E+00	-	1.14
Σ _{f2}	7.84E-02	0.00E+00	7.71E-02	8.00E-05	0.00E+00	-	-1.69
Σ _{1→2}	1.66E-02	3.15E-02	1.75E-02	7.00E-05	3.30E-02	1.40E-04	5.14
Σ _{2→1}	1.65E-03	3.28E-04	1.77E-03	8.20E-04	3.31E-04	1.79E-03	6.78
Σ _{tot1}	5.56E-01	6.85E-01	5.65E-01	2.00E-05	6.87E-01	6.00E-05	1.59
Σ _{tot2}	1.45E+00	2.06E+00	1.44E+00	3.00E-05	2.06E+00	2.00E-05	-0.69
vΣ _{f1}	8.88E-03	0.00E+00	8.83E-03	8.00E-05	0.00E+00	-	-0.57
vΣ _{f2}	1.94E-01	0.00E+00	1.88E-01	8.00E-05	0.00E+00	-	-3.19
D ₁	1.484	1.371	1.058		0.893		-40.26
D ₂	0.351	0.249	0.308		0.219		-13.96

La variazione relativa definita in riferimento a SCALE 6.1.3 mostra, ad eccezion fatto dei coefficienti di diffusione, un buon accordo numerico tra i due codici. La Tab.4.14 riporta i risultati ottenuti per il caso eterogeneo in cui l'acronimo "n.a." indica che il valore non è direttamente disponibile perché la quantità relativa è stata calcolata come combinazione di altri valori.

Tabella 4.14: Risultati ottenuti con SCALE 6.1.3 e SERPENT 2.0

	SCALE 6.1.3			SERPENT 2.1.0					
	$[\text{het}/\text{het}]$			$[\text{het}/\text{het}]$					
	Assem.	Shroud	Acqua	Assem.	σ	Shroud	σ	Acqua	σ
	$[\text{cm}^{-1}]$	$[\text{cm}^{-1}]$	$[\text{cm}^{-1}]$	$[\text{cm}^{-1}]$	$[\text{cm}^{-1}]$	$[\text{cm}^{-1}]$	$[\text{cm}^{-1}]$	$[\text{cm}^{-1}]$	$[\text{cm}^{-1}]$
K_{eff}	1.22897			1.23396 \pm 0.0007					
Σ_{a1}	1.00E-02	4.48E-03	3.76E-04	1.02E-02	7.0E-05	4.16E-03	3.4E-04	3.94E-04	2.2E-04
Σ_{a2}	1.10E-01	1.48E-01	1.08E-02	1.08E-01	6.0E-05	1.22E-01	1.1E-04	1.05E-02	2.0E-05
Σ_{f1}	3.46E-03	0.00E+00	0.00E+00	3.50E-03	7.0E-05	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
Σ_{f2}	7.84E-02	0.00E+00	0.00E+00	7.71E-02	6.0E-05	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
$\Sigma_{1 \rightarrow 2}$	1.66E-02	1.40E-03	4.55E-02	1.75E-02	6.0E-05	1.58E-03	1.7E-03	4.70E-02	1.3E-04

$\Sigma_{2 \rightarrow 1}$	1.65E-03	1.94E-03	2.52E-04	1.77E-03	7.5E-04	1.98E-03	2.6E-03	2.52E-04	1.6E-03
Σ_{tot1}	5.56E-01	5.54E-01	7.46E-01	5.65E-01	2.0E-05	5.48E-01	1.1E-04	7.48E-01	7.0E-05
Σ_{tot2}	1.45E+00	1.16E+00	2.11E+00	1.44E+00	3.0E-05	1.12E+00	1.0E-05	2.10E+00	1.0E-05
$v\Sigma_{f1}$	8.75E-03	0.00E+00	0.00E+00	8.83E-03	n. a.	0.00E+00	n. a.	0.00E+00	n. a.
$v\Sigma_{f2}$	1.91E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.88E-01	n. a.	0.00E+00	n. a.	0.00E+00	n. a.
D_1	1.484	1.077	1.756	1.057	n. a.	0.649	n. a.	1.072	n. a.
D_2	0.351	0.293	0.248	0.308	n. a.	0.300	n. a.	0.216	n. a.

Le Tab. 4.15 e 4.16 presentano i risultati, per lo stesso benchmark, per come riportati in letteratura e calcolati con i codici DRAGON e MCNP5+TEDM. In questo caso l'acronimo "n.a." indica che i valori non vengono riportati nella letteratura di riferimento mentre la variazione relativa (var_rel) viene calcolata scegliendo come caso di riferimento SCALE 6.1.3 [het/het].

Tabella 4.15: Risultati presenti in letteratura - DRAGON

	DRAGON					
	Assembly	var_rel	Shroud	var_rel	Acqua	var_rel
	[cm ⁻¹]	[%]	[cm ⁻¹]	[%]	[cm ⁻¹]	[%]
K_{eff}	n.a.					
Σ_{a1}	1.12E-02	11.98	4.69E-03	4.73	2.20E-04	-41.55
Σ_{a2}	1.14E-01	3.85	1.50E-01	1.59	1.10E-02	1.77
Σ_{f1}	n. a.	-	0.00E+00	-	0.00E+00	-
Σ_{f2}	n. a.	-	0.00E+00	-	0.00E+00	-
$\Sigma_{1 \rightarrow 2}$	1.67E-02	0.50	2.00E-03	42.42	5.13E-02	12.64
$\Sigma_{2 \rightarrow 1}$	1.00E-06	-	0.00E+00	-	2.80E-04	11.31
Σ_{tot1}	n. a.	-	n. a.	-	n. a.	-
Σ_{tot2}	n. a.	-	n. a.	-	n. a.	-
$v\Sigma_{f1}$	8.43E-03	-3.66	0.00E+00	-	0.00E+00	-
$v\Sigma_{f2}$	1.61E-01	-15.87	0.00E+00	-	0.00E+00	-
D_1	1.4375	-3.11	1.455	35.06	1.4712	-16.21
D_2	0.826	135.15	0.6362	117.21	0.2525	1.94

Tabella 4.16: Risultati presenti in letteratura - MCNP5

	MCNP5					
	Assembly	Var_rel	Shroud	Var_rel	Acqua	Var_rel
	[cm ⁻¹]	[%]	[cm ⁻¹]	[%]	[cm ⁻¹]	[%]
K_{eff}	n. a.					
Σ_{a1}	9.59E-03	-4.26	4.72E-03	53.77	4.03E-04	7.10
Σ_{a2}	8.80E-02	-19.95	1.49E-01	9.78	1.13E-02	4.44
Σ_{f1}	n. a.	-	0.00E+00	-	0.00E+00	-
Σ_{f2}	n. a.	-	0.00E+00	-	0.00E+00	-
$\Sigma_{1 \rightarrow 2}$	1.80E-02	8.39	1.40E-02	899.08	5.34E-02	17.32
$\Sigma_{2 \rightarrow 1}$	n. a.	-	n.a.	-	2.43E-04	-3.59
Σ_{tot1}	n. a.	-	n. a.	-	n. a.	-
Σ_{tot2}	n. a.	-	n. a.	-	n. a.	-
$v\Sigma_{f1}$	7.14E-03	-18.39	0.00E+00	-	0.00E+00	-

$v\Sigma_{f2}$	1.49E-01	-22.16	0.00E+00	-	0.00E+00	-
D_1	1.4376	-3.11	1.4556	351.18	1.4705	-16.25
D_2	0.8273	135.52	0.6364	117.28	0.2523	1.86

I risultati trovati mostrano una variazione relativa non trascurabile (maggiore di un ordine di grandezza) sui coefficienti di diffusione; il valore della sezione d'urto di downscattering ($\Sigma_{1\rightarrow 2}$) nella zona dello shroud valutata con la sequenza MCNP5+TEDM, data la maggior concordanza nel confronto tra i valori determinati da SCALE e DRAGON (con una variazione relativa pari a circa il 40%), si ritiene sia stata erroneamente riportata nella letteratura di riferimento.

Si è anche fatta un'analisi per verificare i risultati che si otterrebbero nel caso in cui il riflettore venisse preliminarmente omogeneizzato. I valori numerici ottenuti insieme con il confronto con i dati eterogenei viene riportato nella Tab. 4.17.

Tabella 4.17: Risultati dei casi omogeneo ed eterogeneo

	SCALE 6.1.3		SCALE 6.1.3		Assembly	Riflettore
	[het/hom]		[hom/hom]			
	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	var_rel	var_rel
	[cm-1]	[cm-1]	[cm-1]	[cm-1]	[%]	[%]
K_{eff}	1.22876		1.23726		+850 pcm	
Σ_{a1}	1.00E-02	1.68E-03	9.97E-03	8.83E-04	-0.30	-47.44
Σ_{a2}	1.10E-01	1.71E-02	1.11E-01	2.46E-02	0.90	43.86
Σ_{f1}	3.46E-03	0.00E+00	3.45E-03	0.00E+00	-0.29	
Σ_{f2}	7.84E-02	0.00E+00	7.90E-02	0.00E+00	0.76	
$\Sigma_{1\rightarrow 2}$	1.66E-02	3.15E-02	1.65E-02	3.95E-02	-0.61	25.40
$\Sigma_{2\rightarrow 1}$	1.65E-03	3.28E-04	1.59E-03	4.58E-04	-3.77	39.63
Σ_{tot1}	5.56E-01	6.85E-01	5.54E-01	7.13E-01	-0.36	4.09
Σ_{tot2}	1.45E+00	2.06E+00	1.45E+00	1.99E+00	0.00	-3.40
$v\Sigma_{f1}$	8.88E-03	0.00E+00	8.74E-03	0.00E+00	-1.60	
$v\Sigma_{f2}$	1.94E-01	0.00E+00	1.93E-01	0.00E+00	-0.52	
D_1	1.484	1.371	1.489	1.674	0.34	22.10
D_2	0.351	0.249	0.349	0.256	-0.57	2.81

L'analisi di sensitività sull'effetto della variazione della concentrazione di boro nell'acqua ha portato ai risultati espressi nella Tab. 4.18.

Tabella 4.18: Risultati per differenti concentrazioni di boro

SCALE 6.1.3					
[het/het – zona d'acqua del riflettore]					
C_b	K_{eff}	ΔK_{eff}	Σ_{a2}	$\Delta \Sigma_{a2}$	$\Delta \Sigma_{a2} / \Sigma_{a2}$
[ppm]	[-]	[pcm]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]
0	1.22923	-	1.08E-02	-	-
300	1.19601	-3296	1.69E-02	6.10E-03	56.29
600	1.16560	-3041	2.30E-02	6.01E-03	35.49
900	1.13722	-2838	2.89E-02	5.93E-03	25.83

1200	1.11058	-2664	3.47E-02	-5.85E-03	20.25
1500	1.08549	-2509	4.05E-02	-5.77E-03	16.62
1800	1.06179	-2370	4.62E-02	-5.70E-03	14.07

La Tab. 4.18 nella prima colonna riporta le diverse concentrazioni di boro utilizzate nel calcolo, nella seconda i corrispondenti valori del coefficiente di moltiplicazione effettivo, nella terza la variazione assoluta di K_{eff} , nella quarta l'andamento della sezione d'urto di assorbimento termico (Σ_{a2}), nella quinta la variazione assoluta di Σ_{a2} e nella sesta la percentuale di variazione relative di Σ_{a2} . In ultimo, la Fig. 4.15 viene riportato l'andamento della variazione della sezione d'urto d'assorbimento termico con la concentrazione di boro nella zona di riflessione.

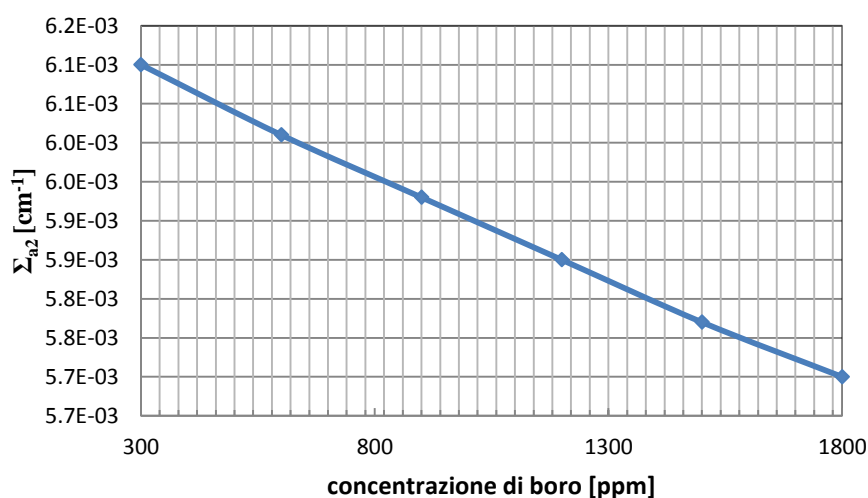


Figura 4.15: Variazione della Σ_{a2} con la concentrazione di boro

4.6 Confronti dei risultati ottenuti con quelli del Benchmark

Il gruppo di lavoro del benchmark NEA/NSC/DOC/(2013)7 ha reso disponibile un'analisi statistica preliminare dei risultati del calcolo delle sezioni d'urto efficaci per la sola zona dell'assembly 15x15 del sistema PWR TMI-I realizzato dai diversi enti di ricerca che partecipano al progetto UAM. Si è quindi proceduto a confrontare tali risultati con quelli ottenuti nel lavoro di tesi con SCALE 6.1.3 e SERPENT 2.0. Il risultato del confronto numerico viene riportato in Tab. 4.19.

Tabella 4.19: Valori parametri cella PWR Bench. vs SCALE 6.1.3 e SERPENT 2.0 – assembly 15x15 PWR TMI-I

Parametri	Bench.	RSD	Serpent 2.0	Var	Scale 6.1.3	(Serp-Ben.) /Ben.	(Scale-Ben.) /Ben.
	[cm ⁻¹], [cm]	[%]	[cm ⁻¹], [cm]	[%]	[cm ⁻¹], [cm]	[%]	[%]
K_{eff}	1.41230	0.458	1.41002	0.550	1.4135	-0.16	0.08
Σ_{a1}	1.09E-02	0.854	1.07E-02	0.560	1.01E-02	-1.48	-6.98
Σ_{a2}	1.24E-01	0.331	1.12E-01	0.480	1.12E-01	-9.58	-9.98
Σ_{f1}	3.57E-03	0.499	3.70E-03	0.570	3.50E-03	3.70	-2.01
Σ_{f2}	7.95E-02	0.226	8.00E-02	0.510	7.96E-02	0.58	0.13

$\Sigma_{1 \rightarrow 2}$	1.65E-02	1.075	1.78E-02	0.440	1.63E-02	8.14	-1.31
$\Sigma_{2 \rightarrow 1}$	1.76E-02	1.006	1.85E-03	5.300	1.66E-03	-89.46	-90.54
Σ_{tr1}	2.79E-01	1.813	3.23E-01	-	2.25E-01	15.95	-19.33
Σ_{tr2}	8.90E-01	0.305	1.09E+00	-	9.45E-01	22.55	6.15
D_1	1.44	1.296	1.03	-	1.48	-28.44	2.85
D_2	0.37	0.16	0.31	-	0.35	-17.63	-4.90

In cui RSD è la variazione standard relativa valutata su tutti i dati disponibili dai diversi enti di ricerca, Var è la varianza assoluta per come riportata nel calcolo con SERPENT 2.0 e Serp-Bench e Scale-Bench è la variazione percentuale relativa dei dati di SERPENT 2.0 e di SCALE 6.1.3 scegliendo come riferimento i dati del benchmark. Il discostamento di un fattore 1.9 del dato di sezione d'urto di scattering 2-1 rispetto al dato riportato dal benchmark è apparso sin da subito anomalo. Infatti, ispezionando la Tab. 5.19 si osserva un'incongruenza fisica dovuta al fatto che il valore numerico della $\Sigma_{2 \rightarrow 1}$ risulta essere maggiore di quella della $\Sigma_{1 \rightarrow 2}$. Per risolvere tale problematica è stato contattato il gruppo di lavoro che ha elaborato i risultati del benchmark che ha confermato l'anomalia del risultato dovuto ad un'erronea valutazione, da parte di alcuni enti di ricerca partecipanti al benchmark, delle sezioni d'urto di scattering. Disaggregando i dati incorretti si ottiene la Tab. 4.20.

Tabella 4.20: Valori dei parametri di cella corretti benchmark - assembly 15x15 PWR TMI-I

Parametri	Benchmark	RSD	Serpent	Var	Scale	Serp-Bench	Scale-Bench
	[cm ⁻¹], [cm]	[%]	[cm ⁻¹], [cm]	[%]	[cm ⁻¹], [cm]	[%]	[%]
Keff	1.41230	0.458	1.41002	0.550	1.4135	-0.16	0.08
Σ_{a1}	1.09E-02	0.854	1.07E-02	0.560	1.01E-02	-1.48	-6.98
Σ_{a2}	1.24E-01	0.331	1.12E-01	0.480	1.12E-01	-9.58	-9.98
Σ_{f1}	3.57E-03	0.499	3.70E-03	0.570	3.50E-03	3.70	-2.01
Σ_{f2}	7.95E-02	0.226	8.00E-02	0.510	7.96E-02	0.58	0.13
$\Sigma_{1 \rightarrow 2}$	1.65E-02	1.075	1.78E-02	0.440	1.63E-02	8.14	-1.31
$\Sigma_{2 \rightarrow 1}$	1.81E-03	11.45	1.85E-03	5.300	1.66E-03	2.42	-8.07
Σ_{tr1}	2.79E-01	11.45	3.23E-01		2.25E-01	15.95	-19.33
Σ_{tr2}	8.90E-01	0.305	1.09E+00		9.45E-01	22.55	6.15
D_1	1.44	1.296	1.03		1.48	-28.44	2.85
D_2	0.37	0.16	0.31		0.35	-17.63	-4.90

La Tab. 4.20 mostra come l'accordo tra i risultati corretti del benchmark e quelli ottenuti con SERPENT 2.0 e SCALE 6.1.3 risulta essere sensibilmente migliorato nella valutazione della sezione d'urto di scattering 2-1.

Un altro confronto del valore dei parametri di cella è stato possibile realizzarlo, sempre per la sola zona dell'assembly, con i risultati numerici ottenuti con SCALE 6.2 dall'Università Politecnica di Valenza utilizzando i dati provenienti dal benchmark UAM. La Tab. 4.21 mostra il confronto dei dati di SCALE 6.1.3 e 6.2 con i dati di cella aggiornati disponibili dal benchmark.

Tabella 4.21: Valori parametri cella Benchmark vs SCALE 6.1.3 E SCALE 6.2 – assembly 15x15 PWR TMI-I

Parametri	Benchmark	SCALE 6.2	SCALE 6.1.3	(SCALE 6.1.3 -B)/B	(SCALE6.2-B)/B
	[cm ⁻¹],[cm]	[cm ⁻¹],[cm]	[cm ⁻¹],[cm]	[%]	[%]
K_{eff}	1.413	1.411	1.413	0.0	-0.1
Σ_{a1}	1.050E-02	1.060E-02	1.014E-02	-3.4	1.0
Σ_{a2}	1.110E-01	1.111E-01	1.116E-01	0.6	0.1
Σ_{f1}	3.550E-03	3.624E-03	3.498E-03	-1.5	2.1
Σ_{f2}	7.870E-02	7.933E-02	7.960E-02	1.1	0.8
D₁	1.371E+00	1.416E+00	1.481E+00	8.0	3.3
D₂	3.480E-01	3.542E-01	3.528E-01	1.4	1.8

Il confronto dei risultati ottenuti con le due versioni di SCALE con quelli del benchmark UAM sono in ottimo accordo.

4.7 Conclusioni

L'analisi svolta sul sistema proposto dal benchmark NEA/NSC/DOC/(2013)7 ha permesso una verifica preliminare della reale capacità di calcolo delle librerie di sezioni d'urto efficaci da parte del codice di riferimento (SCALE 6.1.3). I risultati ottenuti hanno evidenziato, ad eccezione fatta dei coefficienti di diffusione, un buon accordo (differenze tra 1-7%) con quelli del codice SERPENT per il caso 2 omogeneo [*het/hom*]; gli stessi risultati si sono dimostrati in discreto accordo per il caso 1 eterogeneo con una differenza tra il 12% ed il 17%. I coefficienti di diffusione mostrano un discostamento più evidente. Le discrepanze rilevate sono probabilmente attribuibili alla circostanza che SERPENT può produrre risultati non corretti quando il calcolo delle costanti di gruppo viene effettuato su universi diversi da quello corrispondente all'intero sistema. Il confronto col codice MCNP+TEDM rivela un sufficiente accordo (differenza tra 3-22%) eccezione fatta per i coefficienti di diffusione e le sezioni d'urto di scattering che, particolarmente nella zona delle shorud, mostrano sostanziali differenze.

I risultati ottenuti per la configurazione geometria omogeneizzata [*hom/hom*] mostrano una differenza sui singoli valori delle costanti di gruppo tra il 2% ed il 90% rispetto al caso eterogeneo. Quest'ultimo risultato ha evidenziato l'esigenza di effettuare i successivi calcoli delle costanti di gruppo sui riflettori pesanti (EPR-like) utilizzando una geometria esatta. La variazione della sezione d'urto d'assorbimento al variare della concentrazione di boro ha mostrato uno scostamento massimo pari a circa il 6%.

Capitolo 5 – Modelli di riflettore PWR

5.1 Introduzione

In questo capitolo viene presentata una disamina dei calcoli effettuati sui sistemi assembly-riflettore per reattori PWR e BRW per come vengono discussi ed elaborati in alcuni documenti tecnici prodotti da specifici enti di ricerca (RISO, EPRI, ENEA, MIT). Per ciascun modello analizzato, vengono riportate le caratteristiche geometriche e materiali, le metodiche di calcolo utilizzate ed i risultati ottenuti col codice di riferimento (SCALE 6.1.3) in termini di mappe, profili di flusso e parametri efficaci. Il lavoro è stato realizzato sia con l'obiettivo di approfondire la conoscenza delle modellizzazioni che storicamente sono state utilizzate per lo studio dei sistemi assembly/riflettore, sia per ottenere un'ulteriore verifica delle capacità del codice di riferimento di fare predizione di sezioni d'urto efficaci in sistemi assembly/riflettore LWR che rappresentano condizioni geometriche e materiali consistenti con un sistema reale.

5.2 Il riflettore RISO (1981)

I laboratori nazionali RISO della Danimarca realizzarono nel 1981 una serie di calcoli per la valutazione delle sezioni d'urto efficaci di riflettore per un PWR Westinghouse a 3 loop da 3000 MWth [13]. Gli assembly del sistema analizzato sono costituiti da 264 barre di combustibile meccanicamente assemblate in un array quadrato 17x17 in cui le rimanenti 25 posizioni sono occupate al centro da un tubo strumentale e nei restanti 24 alloggiamenti da tubi guida. Le barre di combustibile sono costituite da pellet ceramiche cilindriche di UO_2 leggermente arricchito racchiuse in clad cilindrici di Zircaloy-4. Il documento riporta i risultati di un calcolo delle sezioni d'urto di riflettore per due configurazioni di riferimento utilizzando specifiche condizioni operative. Nei paragrafi seguenti viene riportato il dettaglio geometrico e materiale del sistema assembly, cella di combustibile, tubo guida e riflettore e le condizioni operative utilizzate per il calcolo. I risultati ottenuti dal rapporto RISO sono riportati in termini di matrici gamma.

Cella di combustibile

La cella unitaria di combustibile dell'assembly 17x17 presenta caratteristiche dimensionali e materiali riportate nella Fig. 5.1.

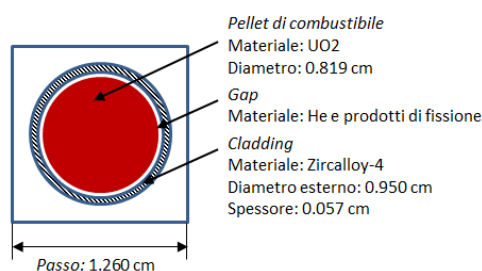


Figura 5.1: geometria e materiali cella di combustibile - RISOM

Il calcolo, per esigenze del codice, è stato a suo tempo realizzato utilizzando una cella di combustibile equivalente costituita da tre regioni cilindriche concentriche; l'area della regione del moderatore è stata scelta in modo tale essere identica a quella del reticolo quadrato reale. La zona del gap ed il cladding sono stati omogeneizzati ed il quantitativo di materiale corrispondente alla cella di combustibile è stato incluso nella regione interna al cladding. Si è trascurata l'influenza della variazione della temperatura sulla densità dei materiali e su tutta la geometria della cella. Le condizioni operative sono state scelte in modo tale da avere una temperatura media del combustibile pari a 675 °C ed una temperatura media del cladding di 300 °C. La concentrazione di boro nel moderatore è stata posta pari a 900 ppm (condizioni di HZP). La Fig. 5.2 riporta le caratteristiche dimensionali della cella di combustibile equivalente.

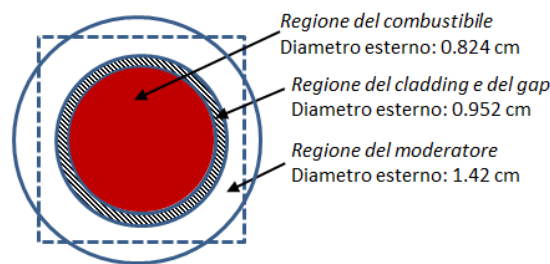


Figura 5.2: geometria cella di combustibile equivalente – RISOM

La composizione atomica dei materiali utilizzati per il calcolo nella configurazione di riferimento viene riportata nella Tab. 5.1.

Tabella 5.1: composizione atomica materiali - RISOM

Regione cella combustibile	Materiale	Densità
[-]	[-]	[10 ²⁴ atomi/cm ³]
Combustibile (enr 3.10 wt%)	U-235	4.99E-04
	U-238	2.30E-02
	O	4.70E-02
Cladding	Fe	7.59E-04
	Ni	1.69E-03
	Cr	7.30E-04
	Zr	3.77E-02
	Al	1.28E-03
	C	6.04E-06
	Ti	3.03E-05
Moderatore (boro 900 ppm)	H	4.72E-02
	O	2.36E-02
	B-10	6.89E-06
	B-11	2.84E-05

Tubo guida

Il tubo guida è stato modellizzato secondo la composizione geometrica e materiale mostrata nella Fig. 5.3:

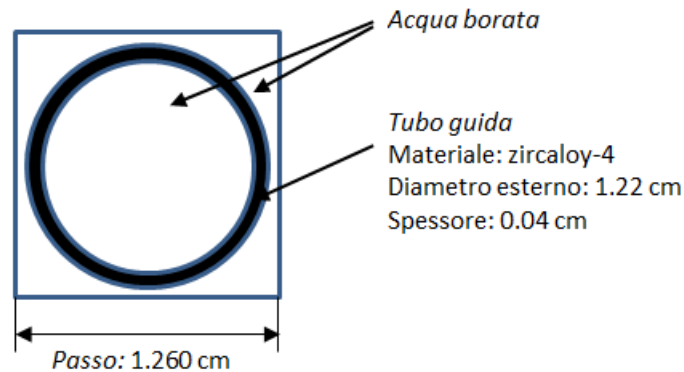


Figura 5.3: geometria tubo guida - RISOM

La configurazione equivalente del tubo guida adottata nel calcolo è riportata nella Fig. 5.4:

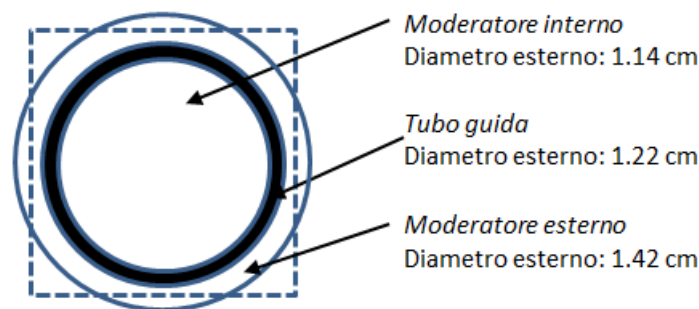


Figura 5.4: geometria equivalente tubo guida - RISOM

Assembly

L'assembly equivalente adottato nel calcolo è composto di 264 pin di combustibile identico, 24 alloggiamenti contenenti i tubi guida ed un alloggiamento centrale contenente un tubo strumentale. L'array di celle di combustibile è stato circondato da un gap d'acqua di 0.43 mm in modo tale che le dimensioni globali dell'assembly risultano essere pari a 215.06x215.06 mm². Il nocciolo di riferimento consta di 9 tipologie di assembly che differiscono tra di loro per l'arricchimento della cella di combustibile, per il numero di pin di borosilicato per assembly e per la presenza o meno della barra di controllo. Per l'effettuazione dei calcoli col codice di riferimento è stato scelto l'assembly periferico caratterizzato da un arricchimento pari al 3.10 w/o senza barre di controllo.

Riflettore

Il riflettore radiale presentato nel rapporto è circondato da acqua borata e acciaio con uno spessore medio di 38 cm. Il supporto più vicino al nocciolo rappresenta la parte principale del riflettore laterale. Tale struttura di supporto al nocciolo consta di un barrel, un

baffle, uno schermo per i neutroni e un supporto per il nocciolo che è saldato al barrel. La Fig. 5.5 riporta il dettaglio costruttivo del riflettore radiale ad un quarto di nocciolo.

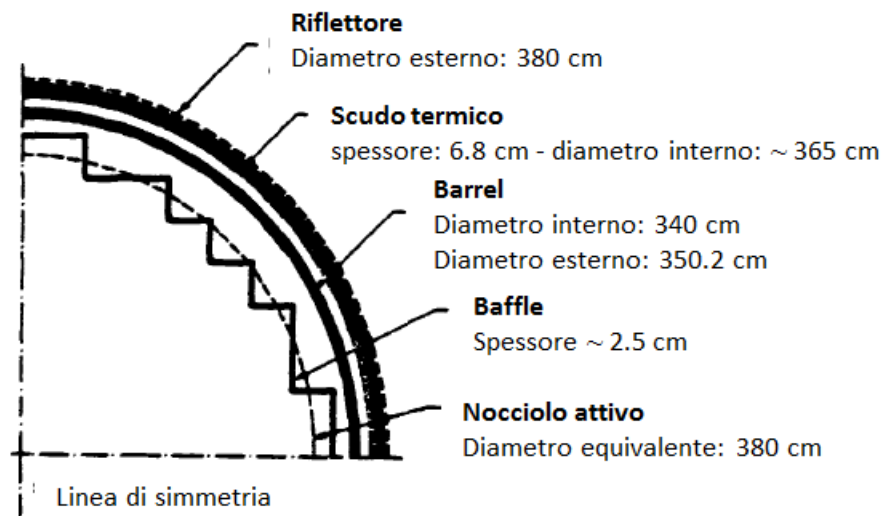


Figura 5.5: sezione trasversale del riflettore radiale

Come per gli altri componenti del sistema, anche per il riflettore radiale è stato utilizzato un modello equivalente che presenta una geometria modificata per tenere in conto delle limitatezze di rappresentazione del codice. La Fig. 5.6 riporta le caratteristiche dimensionali del riflettore equivalente.

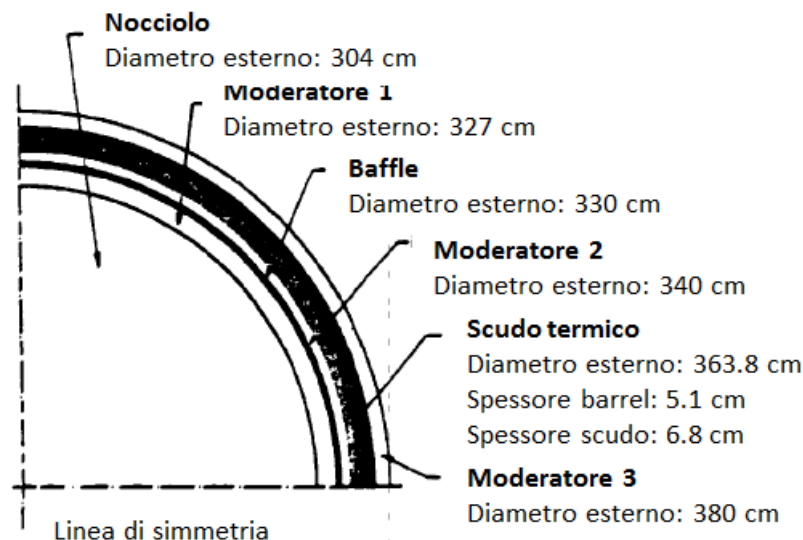


Figura 5.6: geometria del riflettore radiale equivalente per il calcolo – RISOM

Se si confronta la Fig. 5.5 con la Fig. 5.6 si osserva che il baffle è più vicino al nocciolo ed il barrel e lo scudo termico dovrebbero essere separati da un gap. Si è comunque ipotizzato che le approssimazioni adottate non alterino significativamente il risultato finale.

La realizzazione delle simulazioni numeriche è stata effettuata per due configurazioni a slab rappresentative delle condizioni vicino al quarto di asse di simmetria e delle condizioni medie. La Fig. 5.7 riporta le caratteristiche geometriche delle due configurazioni adottate nel rapporto RISOM.

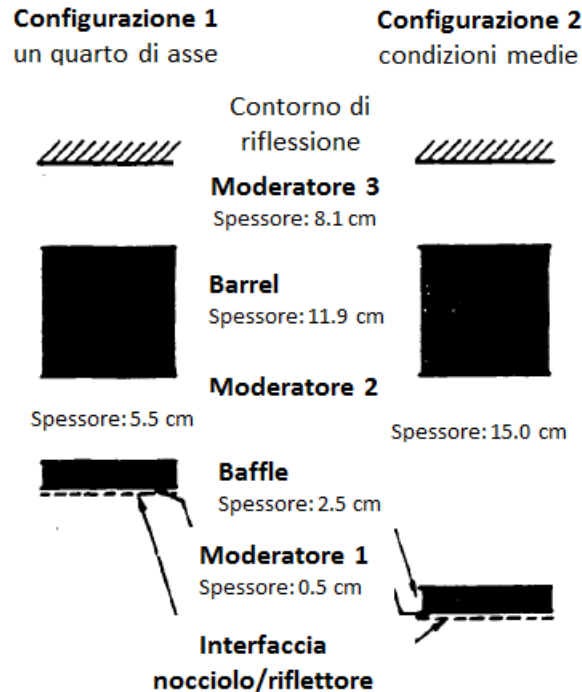


Figura 5.7: configurazioni geometriche utilizzate per il calcolo

I calcoli di riflettore sono stati rappresentati mediante la matrice gamma a 2-gruppi prodotta dal codice HECS. Tale matrice è definita dalla seguente equazione matriciale:

$$\underline{J} = \underline{\gamma} \underline{\phi} \quad (5.1)$$

In cui \underline{J} e $\underline{\phi}$ rappresentano la corrente ed il flusso all'interfaccia tra il nocciolo ed il riflettore. Le sezioni d'urto macroscopiche a due gruppi necessarie per il calcolo HECS sono state generate dal complesso di codici CRS che utilizzano come funzione peso uno spettro fine a 76 gruppi calcolato con il metodo delle probabilità di collisione dalla subroutine GP.

Uno degli obiettivi del rapporto era quello di testare la parte di neutronica stazionaria del programma nodale ANTI che utilizzava la rappresentazione di albedo ad un gruppo per le condizioni al contorno di riflettore. La verifica dei valori di albedo fu effettuata utilizzando il programma alle differenze finite 2-D TWODIM che rappresentava il riflettore in termini di matrice gamma a 2-gruppi; quindi, per confrontare i risultati di TWODIN e ANTI, fu necessaria una trasformazione della matrice gamma in un albedo ad un gruppo. Con questo obiettivo, il rapporto RISOM trasforma i risultati ottenuti in termini di matrice gamma a due gruppi in un albedo ad un gruppo. In accordo con l'approssimazione P_1 dell'equazione del trasporto, le correnti neutroniche parziali sono, rispettivamente, pari a:

$$J_+ = \frac{\phi}{4} + \frac{J}{2} \quad J_- = \frac{\phi}{4} - \frac{J}{2} \quad (5.2)$$

in cui ϕ è il flusso neutronico, mentre $J = J_+ - J_-$ è la corrente neutronica netta. L'albedo ad un gruppo, β , è definito come:

$$\beta = \frac{J_-}{J_+} = \frac{1/2 - \gamma}{1/2 + \gamma}, \quad e \quad \gamma = \frac{J}{\phi} \quad (5.3)$$

Applicando il principio di sovrapposizione per i flussi e le correnti nella teoria a gruppi, l'espressione a due gruppi per il flusso e le correnti nette sono le seguenti:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad J = J_1 + J_2 \quad (5.4)$$

La matrice gamma a due gruppi è definita come:

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & 0 \\ \gamma_{12} & \gamma_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Utilizzando le relazioni (5.4) e (5.5) l'espressione finale per l'albedo ad un gruppo in funzione delle componenti della matrice gamma risulta essere la seguente:

$$\beta = \frac{1/2 - \gamma}{1/2 + \gamma}, \quad e \quad \gamma = \frac{\gamma_{11} + \gamma_{12} + \gamma_{22} \frac{\phi_2}{\phi_1}}{1 + \frac{\phi_1}{\phi_2}} \quad (5.6)$$

Il rapporto dei flussi rappresenta il valore che si ha al contorno tra il nocciolo ed il riflettore. I calcoli che si sono realizzati con SCALE 6.1.3 hanno permesso di determinare gli albedo ad un gruppo e a due gruppi utilizzando le seguenti definizioni:

$$\beta = \frac{J^-}{J^+} \quad \beta_{ij} = \frac{J_j^-}{J_i^+} \quad (5.7)$$

in cui J^- e J^+ sono, rispettivamente, le correnti uscenti ed entranti all'interfaccia nocciolo/riflettore. Il confronto con i dati di matrice gamma forniti dal RISOM è stato effettuato utilizzando la relazione matriciale tra la matrice gamma e la matrice degli albedo.

$$\underline{\underline{\gamma}} = \frac{1}{2} \left[1 + \underline{\underline{\beta}} \right]^{-1} \left[1 - \underline{\underline{\beta}} \right] \quad (5.8)$$

Esplicitando la (5.8) in termini dei singoli componenti, si ottiene la seguente espressione analitica:

$$\underline{\underline{\gamma}} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{21} \\ \gamma_{12} & \gamma_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1 + \beta_{22})(1 - \beta_{11}) + \beta_{12}\beta_{21}}{2(1 + \beta_{22} + \beta_{11} + \beta_{11}\beta_{22} - \beta_{12}\beta_{21})} & \frac{\beta_{12}(1 + \beta_{22}) + \beta_{12}(1 - \beta_{22})}{2(1 + \beta_{22} + \beta_{11} + \beta_{11}\beta_{22} - \beta_{12}\beta_{21})} \\ \frac{\beta_{21}(1 - \beta_{11}) + \beta_{21}(1 + \beta_{11})}{2(1 + \beta_{22} + \beta_{11} + \beta_{11}\beta_{22} - \beta_{12}\beta_{21})} & \frac{(1 + \beta_{11})(1 - \beta_{22}) + \beta_{12}\beta_{21}}{2(1 + \beta_{22} + \beta_{11} + \beta_{11}\beta_{22} - \beta_{12}\beta_{21})} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

5.2.1 Configurazione ad un quarto di asse (1)

La configurazione 1 – ad un quarto di asse – è stata modellizzata col codice di riferimento secondo quanto specificato dal rapporto. Le opzioni di calcolo sono identiche a quelle utilizzate nelle modellizzazioni realizzate per il riflettore RISO. Nelle Fig. 5.8-9 si riporta la distribuzione della griglia computazionale e dei materiali per come prodotta da SCALE.

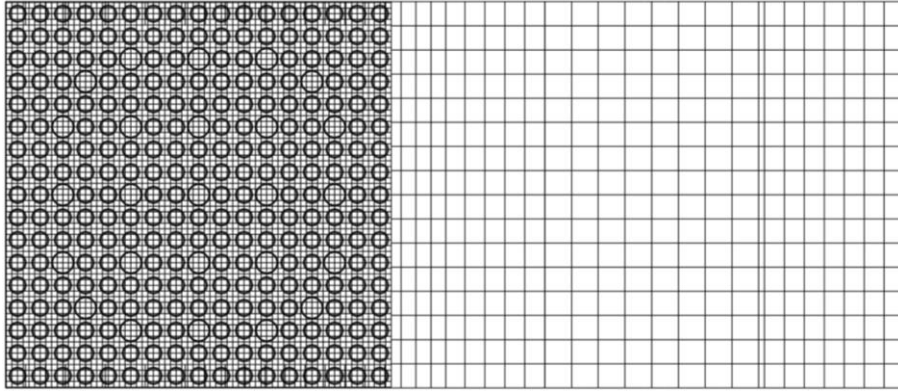


Figura 5.8: griglia computazionale configurazione 1 – RISOM

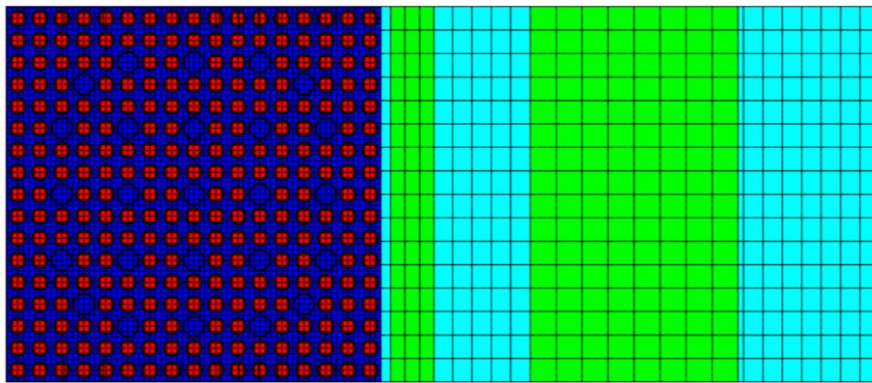


Figura 5.9: distribuzione dei materiali configurazione 1 - RISOM

I risultati di mappe di flusso termico e veloce ottenuti sono riportati nella Fig. 5.10-11

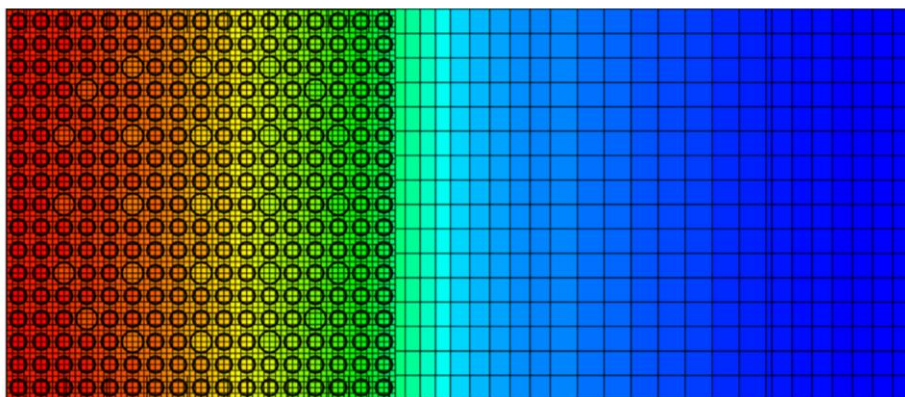


Figura 5.10: Mappa di flusso veloce configurazione 1 - RISOM

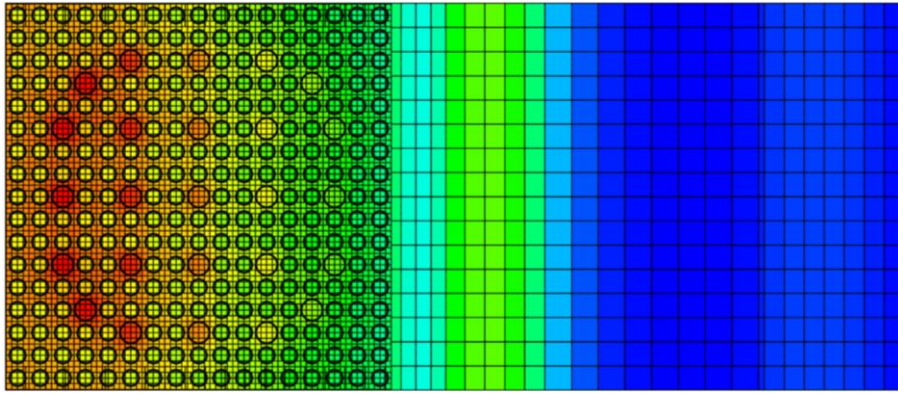


Figura 5.11: Mappa di flusso termico configurazione 1 – RISOM

La rappresentazione dei profili di flusso sull'asse di simmetria è riportato nelle Fig. 5.12-13.

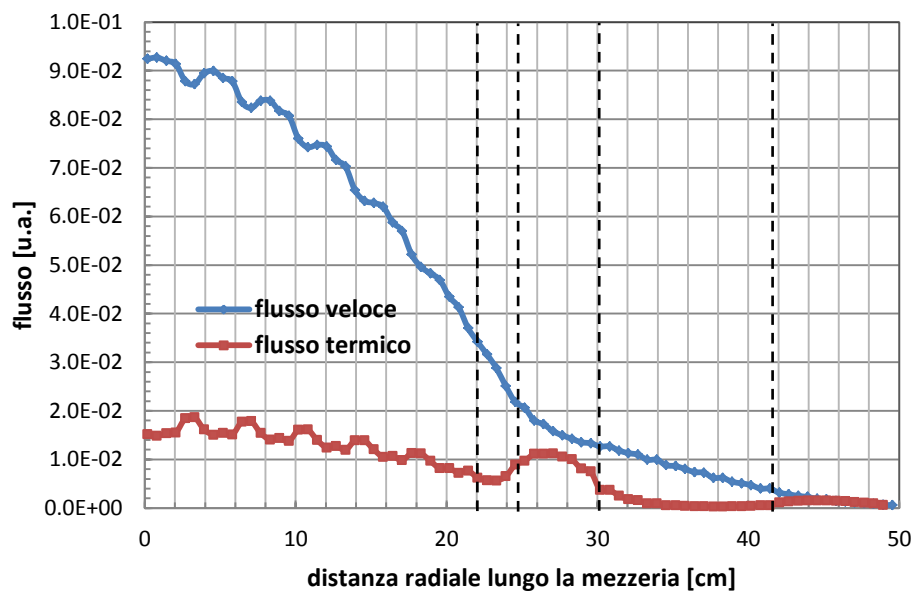


Figura 5.12: profilo di flusso configurazione 1 (lin/lin) - RISOM

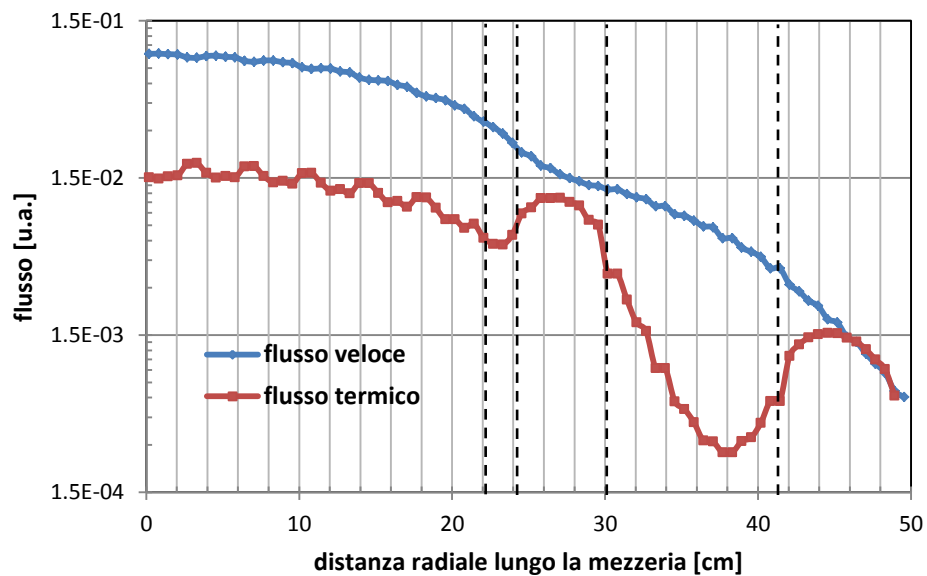


Figura 5.13: profilo di flusso configurazione 1 (log/lin) – RISOM

5.2.2 Configurazione media (2)

La configurazione 2 – rappresentativa delle condizioni geometriche medie del sistema – è stata ugualmente modellizzata col codice di riferimento secondo quanto specificato dal rapporto. Le opzioni di calcolo sono identiche a quelle utilizzate nella configurazione 1. Nelle Fig. 5.14 e 5.15 si riporta la distribuzione della griglia computazionale e dei materiali per come prodotta da SCALE 6.1.3.

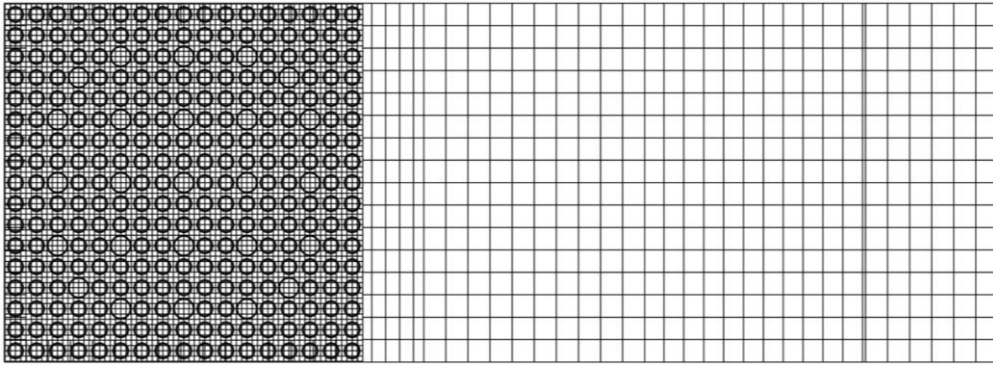


Figura 5.14: griglia computazionale configurazione 2 – RISOM

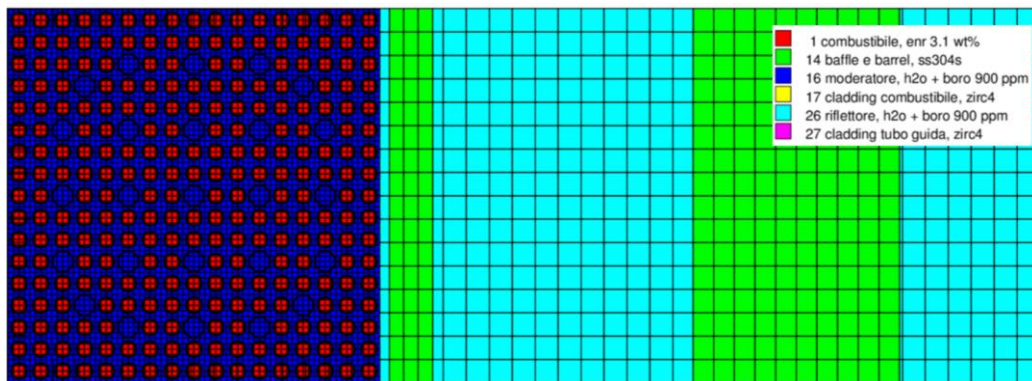


Figura 5.15: distribuzione dei materiali configurazione 2 – RISOM

I risultati ottenuti dalle mappe di flusso termico e veloce, sono riportati nelle Fig. 5.30-31.

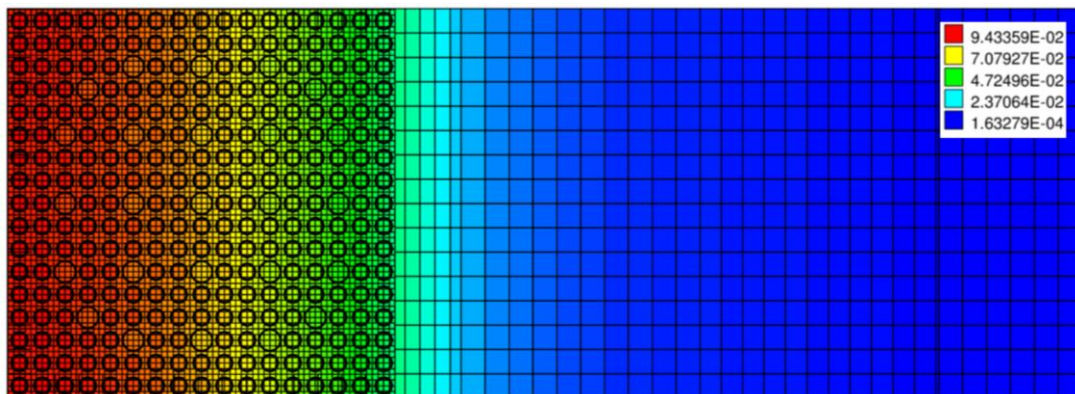


Figura 5.16: mappa di flusso veloce configurazione 2 – RISOM

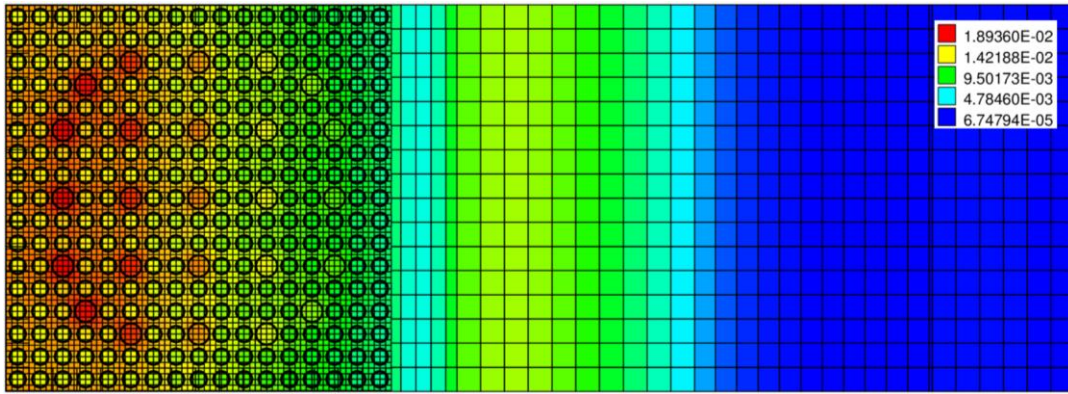
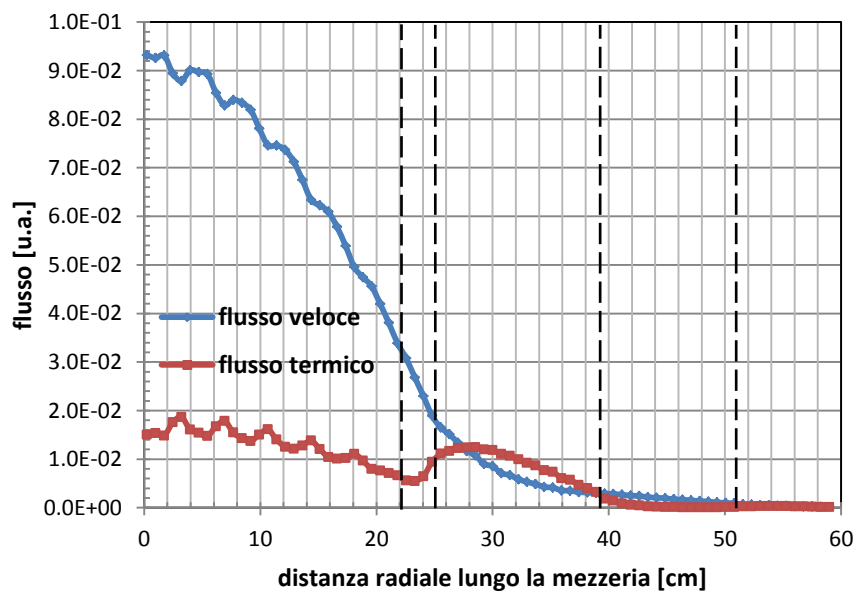
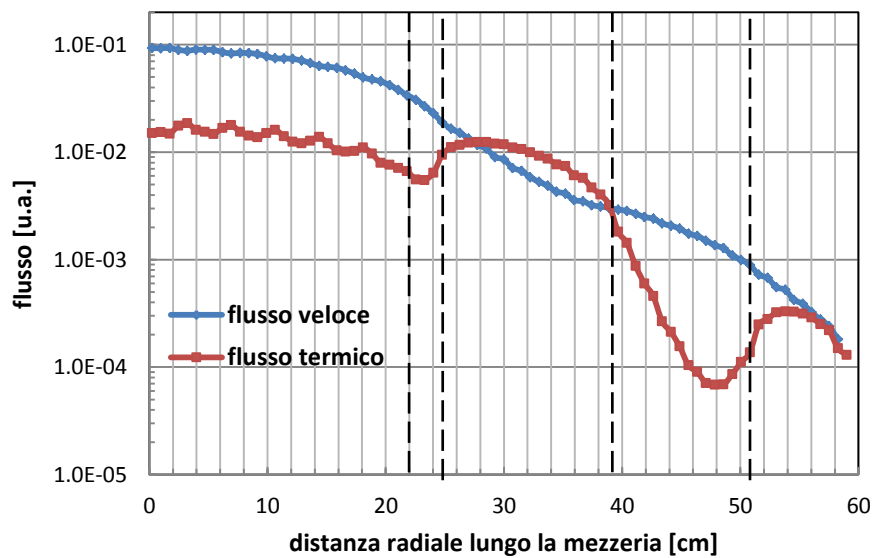


Figura 5.17: mappa di flusso termico configurazione 2 - RISOM

Si riportano i profili di flusso termico e veloce valutati nella zona di mezzeria del sistema.


 Figura 5.18: profili di flusso termico e veloce configurazione 2 (*lin/lin*) - RISOM

 Figura 5.19: profili di flusso termico e veloce configurazione 2 (*log/lin*) - RISOM

5.2.3 Risultati

I valori di albedo ad un gruppo ottenuti con SCALE 6.1.3 sono stati confrontati con quelli presentati dal RISOM. La Tab. 5.2 riporta i valori numerici trovati.

Tabella 5.2: risultati ottenuti da RISOM e da SCALE 6.1.3

	Configurazione 1			Configurazione 2		
	RISOM	SCALE	var_rel	RISOM	SCALE	var_rel
	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]	[%]
β	0.6	0.5560	-7.3	0.61	0.5260	-13.8

Il confronto dei risultati è stato realizzato come variazione relativa percentuale scegliendo come riferimento i valori presentati dal rapporto tecnico RISOM.

Infine, anche se non erano disponibili dati di confronto nel rapporto RISOM, si sono ottenute le sezioni d'urto efficaci omogenee condensate ad uno e due gruppi. I valori trovati sono riportati nella Tab. 5.3.

Tabella 5.3 risultati delle sezioni d'urto efficaci ottenuti da SCALE 6.1.3

	Assembly			Riflettore		
2 Gruppi						
	Conf. 1	Conf. 2	var_rel	Conf. 1	Conf. 2	var_rel
	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]
Σ _{a1}	9.64E-03	9.64E-03	0.01	2.80E-03	2.15E-03	-23.17
Σ _{a2}	8.83E-02	8.83E-02	-0.02	5.47E-02	3.81E-02	-30.46
Σ _{f1}	2.64E-03	2.64E-03	0.02	0.00E+00	0.00E+00	-
Σ _{f2}	5.52E-02	5.52E-02	0.02	0.00E+00	0.00E+00	-
Σ ₁₋₂	1.62E-02	1.61E-02	-0.42	1.85E-02	2.63E-02	42.25
Σ ₂₋₁	1.73E-03	1.73E-03	0.32	1.45E-03	7.86E-04	-45.77
Σ _{tot1}	5.35E-01	5.34E-01	-0.13	6.18E-01	6.34E-01	2.68
Σ _{tot2}	1.30E+00	1.30E+00	-0.17	1.61E+00	1.78E+00	10.45
vΣ _{f1}	6.73E-03	6.73E-03	0.03	0.00E+00	0.00E+00	-
vΣ _{f2}	1.34E-01	1.34E-01	0.02	0.00E+00	0.00E+00	-
D ₁	1.50	1.50	0.12	1.19	1.35	13.76
D ₂	0.38	0.39	0.17	0.30	0.29	-4.54
1 Gruppo						
Σ _a	2.16E-02	2.16E-02	-0.08	1.54E-02	1.59E-02	3.40
Σ _f	1.06E-02	1.06E-02	-0.08	0.00E+00	0.00E+00	-
Σ _{1>1}	6.30E-01	6.29E-01	-0.13	0.00E+00	1.07E+00	-
Σ _{tot}	6.51E-01	6.50E-01	-0.13	8.59E-01	1.09E+00	26.93
vΣ _f	2.62E-02	2.62E-02	-0.08	0.00E+00	0.00E+00	-
D	1.328376	1.33	0.09	0.975	0.953113	-2.21

La variazione relativa del valore numerico trovato per le sezioni d'urto efficaci delle due configurazioni è stata calcolata scegliendo come configurazione di riferimento la 1.

5.3 - Il riflettore EPRI (1984)

L'Electric Power Research Institute (EPRI) di Palo Alto (California – USA) realizzò nel 1984 uno studio per la determinazione delle sezioni d'urto efficaci a pochi gruppi basate sulle ENDF/B-V per la zona del riflettore nei reattori LWR [14]. Anteriormente a questo lavoro, la rappresentazione dei riflettori era basata su una modellizzazione di una regione infinita d'acqua, d'acciaio o di una miscela di acqua/acciaio; le sezioni d'urto così ottenute venivano considerate valide per l'utilizzo in un codice di diffusione 2-D per la determinazione delle caratteristiche neutroniche di un nocciolo nucleare.

Il calcolo delle sezioni d'urto è stato effettuato su uno slab monodimensionale costituito da una zona di combustibile, un baffle ed un riflettore d'acqua. Il calcolo di trasporto è stato eseguito con un codice monodimensionale (XSDRM) in approssimazione S_8 - P_3 utilizzando una libreria a 127 gruppi basata su ENDF/B-V. Le sezioni d'urto omogeneizzate mediate sulla cella così ottenute sono state successivamente collassate a 2 e 4 gruppi utilizzando i flussi precedentemente calcolati col metodo B_1 (spettro critico). La Tab. 5.4 riporta i dati geometrici della regione della cella di combustibile cilindrizata utilizzata nel calcolo.

Tabella 5.4: dimensioni geometriche cella di combustibile

Geometria cella di combustibile		
Raggio pin di combustibile	[cm]	0.4178
Raggio omogeneizzato clad/vuoto	[cm]	0.4750
Raggio esterno moderatore	[cm]	0.745

La Tab. 5.5 riporta, invece, la composizione atomica delle tre regioni costituenti il sistema cella/riflettore (combustibile, baffle e acqua). La composizione dell'uranio corrisponde ad un arricchimento in ^{235}U pari al 3 wt%, mentre quella dell'acqua corrisponde ad un'acqua borata con concentrazione di boro pari a 500 ppm.

Tabella 5.5: composizione dei materiali presenti nel sistema combustibile/riflettore - EPRI

Elemento/composto	Isotopo	Densità
[-]	[-]	[barn.cm] ⁻¹
Uranio	U-238	7.149E-03
	U-235	2.239E-04
Ossigeno		1.477E-02
Zr (nel clad)		3.588E-02
H ₂ O	H	2.802E-02
	O	1.401E-02
	B-10	2.311E-06
SS304s	Cr	1.748e-02

	Mn	1.474E-03
	Fe	5.951E-02
	Ni	8.491E-03

La Tab. 5.2 riporta la sola concentrazione di B-10 per come riportato nel rapporto EPRI, nel sistema risulta comunque essere presente anche l'altro isotopo del boro (B-11).

Il rapporto presenta i risultati delle sezioni d'urto ottenute utilizzando un collassamento a 4 e a 2 gruppi. Gli intervalli energetici utilizzati per realizzare il collassamento è riportato nella Tab. 5.6.

Tabella 5.6: suddivisione degli intervalli energetici nel collassamento a 4 e 2 gruppi

4 Gruppi	Energia inferiore [MeV]	2 Gruppi	Energia inferiore [MeV]
1	0.821	1	0.625
2	5.53E-03	2	0.0
3	0.625E-06		
4	0.0		

Le configurazioni geometriche studiate (baffle a 7/8", 9/8" e 11/8") sono, invece, riportate nella Fig. 5.20. Le condizioni del moderatore sono state poste pari al 70.6% delle STP.

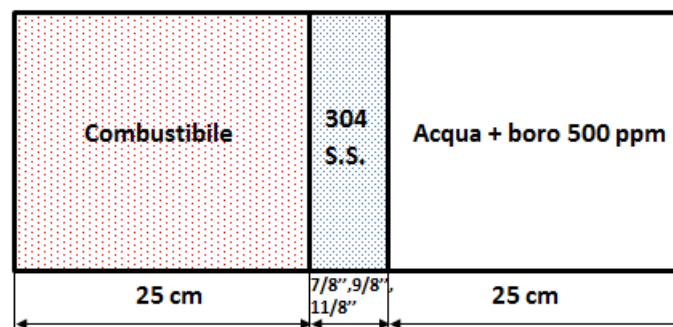


Figura 5.20: Configurazione geometrica sistema combustibile/riflettore – EPRI

Il rapporto non specifica la modellizzazione geometrica della zona del combustibile adottata nel calcolo. Si è pertanto deciso di realizzare le simulazioni modellizzando la zona del combustibile sia con una configurazione omogenea che con una eterogenea; per quest'ultima configurazione, dall'analisi dei dati geometrici di cella forniti (Tab. 5.1), si è stabilito che una probabile configurazione geometrica eterogenea adottabile per la zona del combustibile possa essere un assembly CE 16x16. Nei successivi paragrafi si riportano i risultati ottenuti per la configurazione omogenea, per quella eterogenea ed un confronto con i risultati proposti dal rapporto tecnico EPRI.

5.3.1 Configurazione omogenea

Si è realizzato un calcolo di valutazione delle sezioni d'urto efficaci condensate a 2 e 4 gruppi a partire da una configurazione omogenea della zona di combustibile utilizzando un materiale "fittizio" le cui frazioni massiche di UO_2 e H_2O borata sono state dedotte a partire

dalla Tab.5.2. La configurazione studiata è quella della Fig. 5.1, le opzioni di calcolo adottate sono identiche a quelle specificate nel cap. 5, le condizioni operative scelte per il calcolo sono di HZP (551 K), la griglia computazionale utilizzata è pari a: 80x32 per l'unità globale, 6x32 per la zona del baffle e 32x32 per la zona del combustibile. Le Fig. 6.21-22 riportano la configurazione delle mesh e la disposizione dei materiali adottata per il calcolo con SCALE 6.1.3.

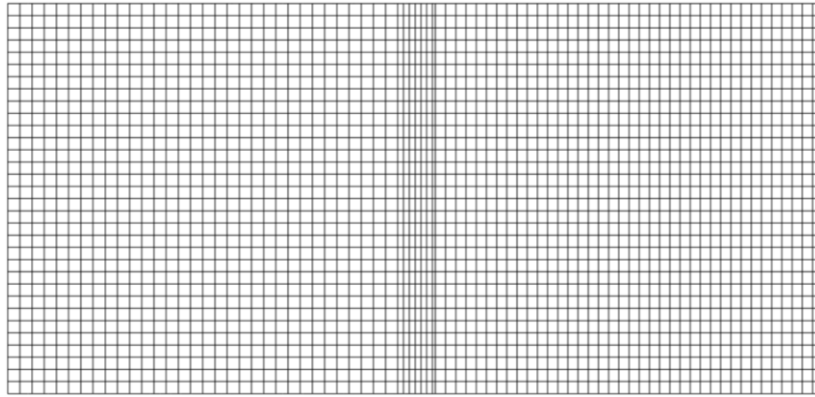


Figura 5.21: Griglia mesh computazionali sistema *omogeneo* combustibile/riflettore –EPRI

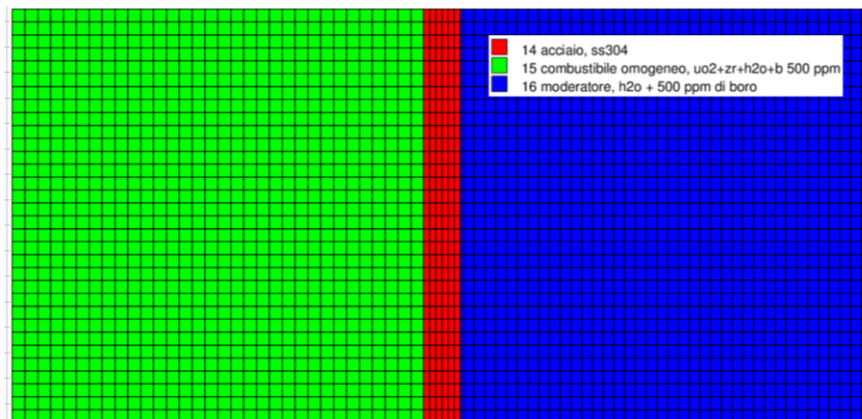


Figura 5.22: disposizione dei materiali sistema *omogeneo* combustibile/riflettore – EPRI

I risultati ottenuti, in termini di mappe di flusso veloce e termico e di profili di flusso nella zona di mezzeria del sistema, sono riportati nelle Fig. 5.23-25.

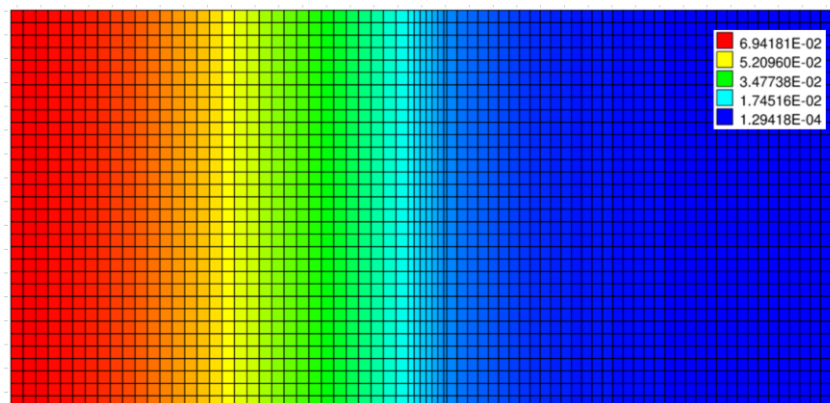
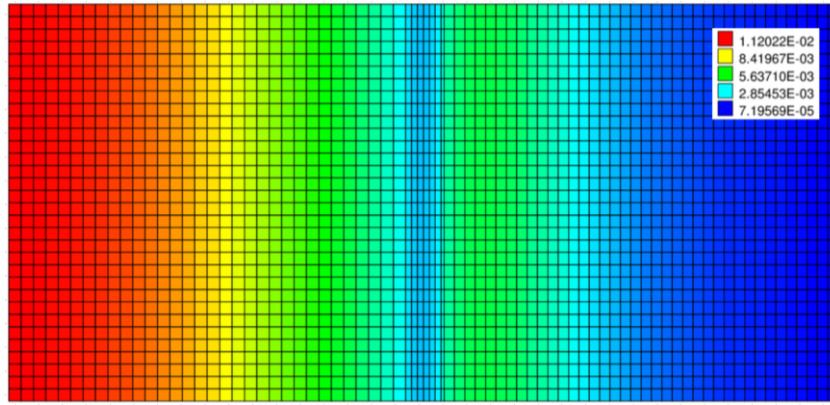
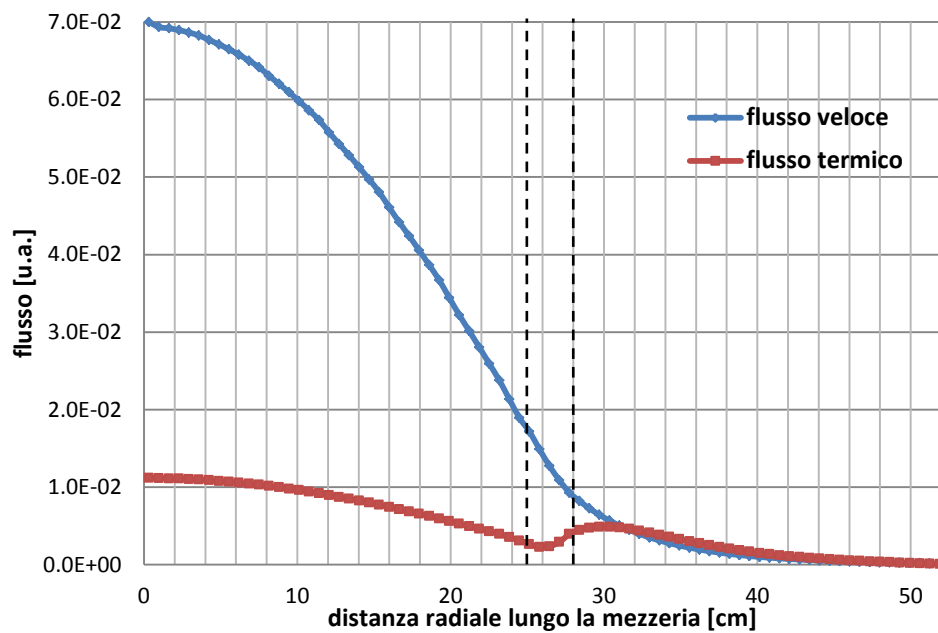


Figura 5.23: Mappa di flusso veloce sistema *omogeneo* combustibile/riflettore – EPRI


 Figura 5.24: mappa di flusso termico *omogeneo* sistema combustibile/riflettore – EPRI

 Figura 5.25: profili di flusso termico e veloce sistema *omogeneo* - EPRI

5.3.2 Configurazione eterogenea

Il calcolo realizzato in configurazione eterogenea ha previsto la modellizzazione della zona di combustibile con un assembly CE 16x16. Il sistema studiato è riportato nella Fig. 6.26.

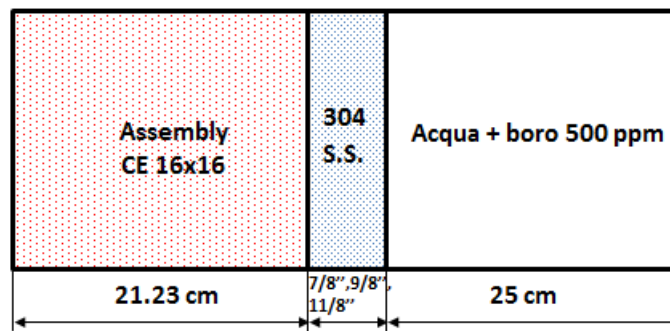


Figure 5.26: Configurazione geometrica sistema combustibile/riflettore – EPRI

Le opzioni di calcolo utilizzate sono identiche alla configurazione omogenea. Nelle Fig. 5.27-29 si riporta la modellizzazione della griglia computazionale e della disposizione dei materiali per come realizzata in SCALE 6.1.3.

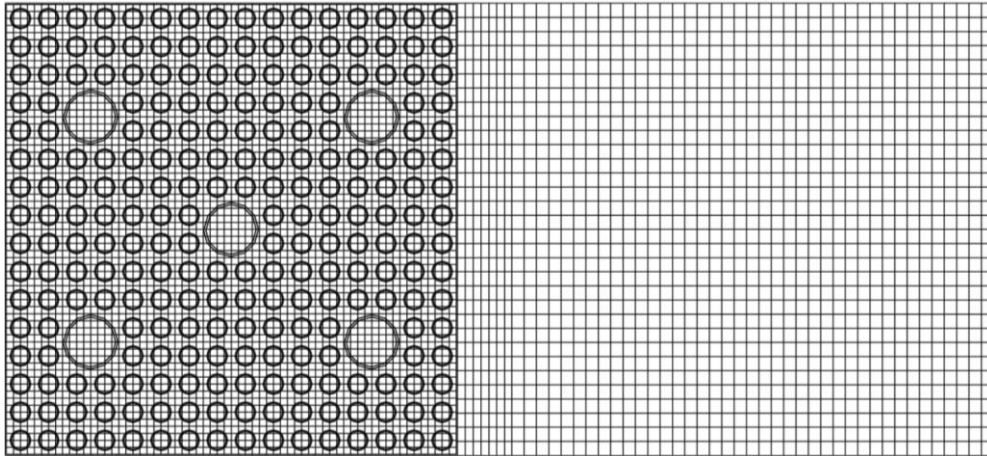


Figura 5.27: Griglia mesh computazionali sistema *eterogeneo* combustibile/riflettore – EPRI

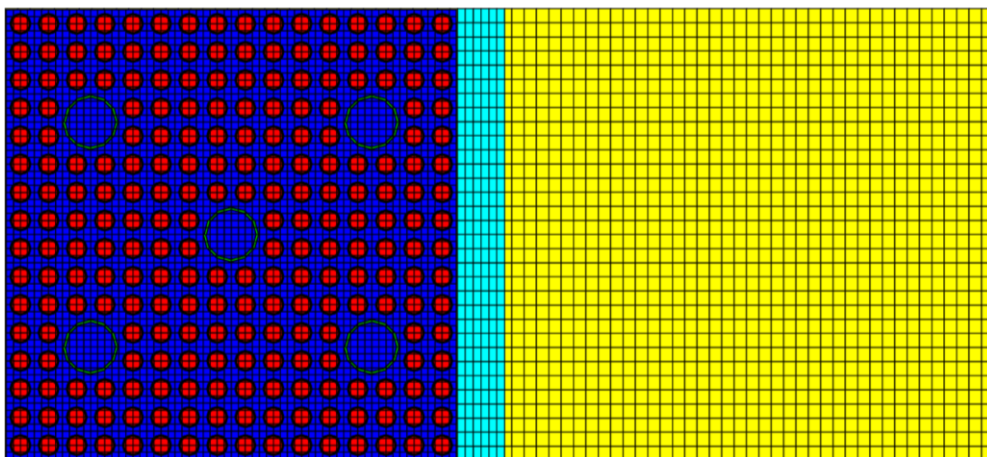


Figura 5.28: disposizione dei materiali sistema *eterogeneo* combustibile/riflettore – EPRI

Le mappe dei flussi termici e il profilo di flusso in mezzzeria sono riportate nelle Fig. 5.30-32

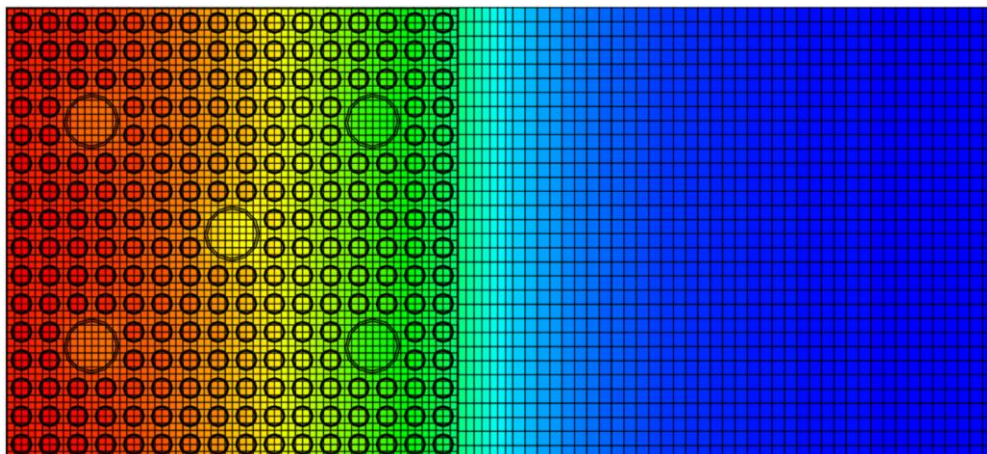


Figura 5.29: Mappa di flusso veloce sistema *eterogeneo* combustibile/riflettore – EPRI

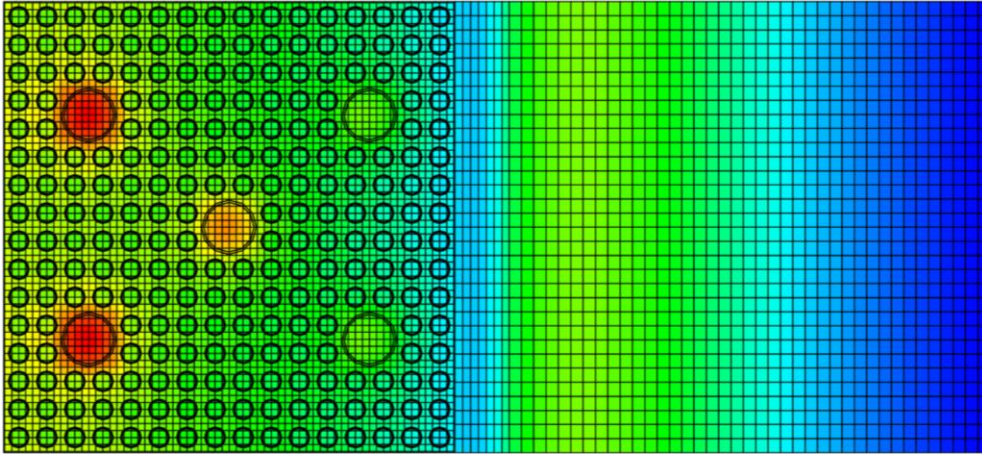


Figura 5.30: Mappa di flusso termico sistema *eterogeneo* combustibile/riflettore - EPRI

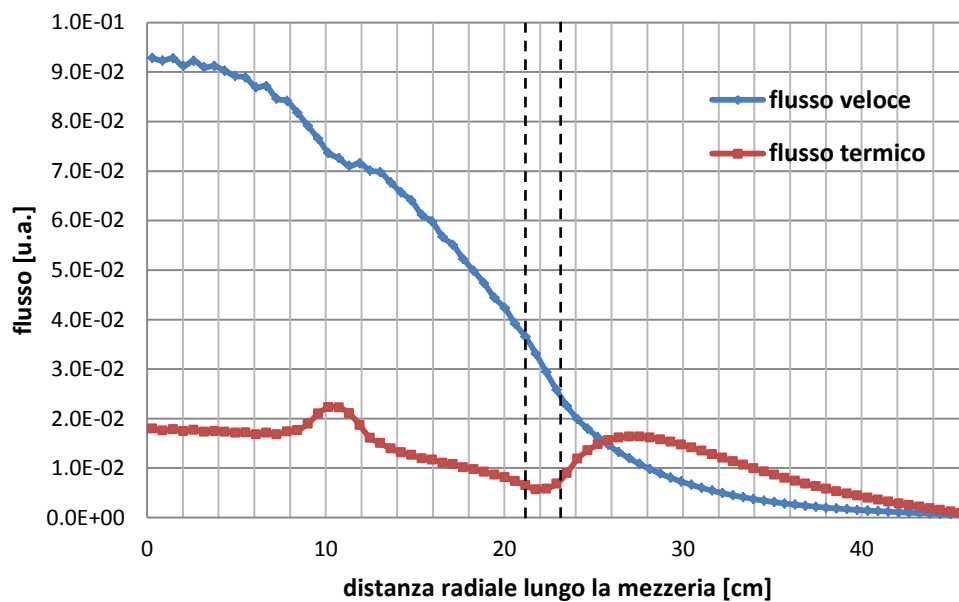


Figura 5.31: profili di flusso termico e veloce sistema *eterogeneo* – EPRI

Il modello omogeneo, presentando una distribuzione uniforme di moderatore e combustibile, determina una maggiore termalizzazione del flusso veloce ed un migliore cattura (per assorbimento e fissione) dei neutroni del flusso termico. Tale circostanza fisica è confermata dal rapporto del valore dei flussi veloci e termici ad $x=0$ e all'interfaccia assembly/riflettore, come riportato nella tabella seguente:

Tabella 5.7: valore dei flussi veloce e termico nella configurazione omogenea ed eterogenea - EPRI

	Configurazione omogenea		Configurazione eterogenea	
	Φ_1	Φ_2	Φ_1	Φ_2
Assembly $x=0$	7.00E-02	1.12E-02	9.28E-02	1.79E-02
Interfaccia Assembly/riflettore	1.72E-02	2.64E-03	2.94E-02	5.80E-03
Rapporto	4.07	4.24	3.16	3.09

L'effetto della diversa modellizzazione del combustibile effettuata nelle due configurazioni sul riflettore può essere anche valutato in termini di rapporto tra il flusso veloce e quello termico all'interfaccia combustibile/riflettore. La Tab.6.8 riporta il risultato numerico di tale rapporto.

Tabella 5.8: rapporto tra flusso veloce e termico all'interfaccia combustibile/riflettore – EPRI

	Conf. Omo.	Conf. Etero.	R omog./eter.
ϕ_1	1.72E-02	2.94E-02	0.59
ϕ_2	2.64E-03	5.80E-03	0.46
ϕ_1/ϕ_2	0.15	0.2	-

Il confronto grafico dell'andamento dei flussi veloci e termici delle due configurazioni analizzate viene riportato nella Fig. 5.33.

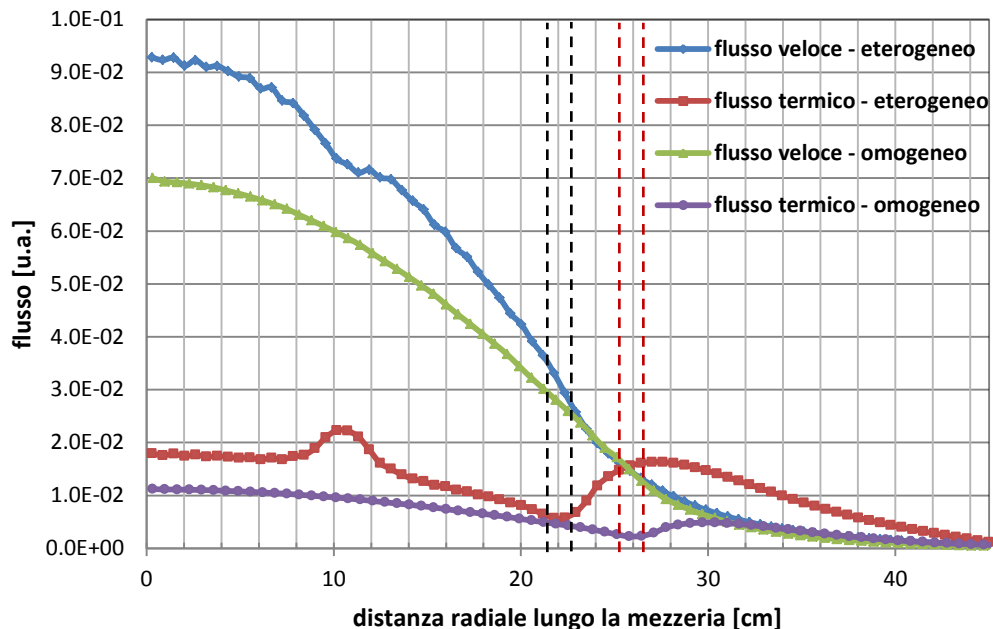


Figura 5.32: confronto profili di flusso casi omogeneo ed eterogeneo

Dai risultati ottenuti si può concludere che la configurazione eterogenea presenta nella zona del combustibile un flusso veloce e termico maggiore e, al contempo, il riflettore reinvia nell'assembly un frazione maggiore di neutroni veloci.

5.3.3 Risultati

A seguire si riportano i confronti fra i risultati ottenuti da SCALE 6.1.3 (caso omogeneo ed eterogeneo) con quelli proposti dal documento EPRI per il caso con dimensioni del baffle pari a 7/8".

Tabella 5.9: Confronto valori di sezioni d'urto efficaci SCALE - EPRI caso *omogeneo*

Sistema hom/het						
7/8"	Baffle			Acqua		
2 Gruppi						
	EPRI	SCALE	Var _{rel}	EPRI	SCALE	Var _{rel}
	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]
Σ _{a1}	4.77E-03	4.56E-03	-4.40	4.93E-04	1.38E-03	179.92
Σ _{a2}	1.49E-01	1.34E-01	-10.07	-	4.04E-02	-
D ₁	0.85	1.01	18.82	1.7	1.7	0.00
D ₂	0.28	0.33	17.86	-	0.28	-
4 Gruppi						
Σ _{a1}	1.30E-03	1.13E-03	-13.08	1.76E-04	2.21E-04	25.57
Σ _{a2}	1.06E-03	6.92E-04	-34.72	1.44E-05	3.63E-05	152.08
Σ _{a3}	1.24E-02	1.08E-02	-12.90	1.25E-03	2.97E-03	137.60
Σ _{a4}	1.49E-01	1.33E-01	-10.74	-	4.04E-02	-
D ₁	1.25	1.79	43.20	2.46	4.07	65.45
D ₂	0.81	1.17	44.44	1.63	1.42	-12.88
D ₃	0.34	0.37	8.82	0.88	0.79	-10.23
D ₄	-	0.33	-	-	0.28	-

Il riferimento scelto per il calcolo della percentuale di variazione relativa (Var_{rel}) è quello del rapporto EPRI. Le discrepanze rilevate nei calcoli di confronto del caso omogeneo possono essere attribuite principalmente all'utilizzo di librerie multigruppo che risentono di una diversa valutazione delle sezioni d'urto (EPRI: ENDF/B-V; SCALE: ENDF/B-VII.0) e che utilizzano una diversa discretizzazione della libreria in gruppi energetici (EPRI: 127 gruppi; SCALE: 238 gruppi). Un altro aspetto fonte d'incertezza è l'indisponibilità delle reali condizioni operative a cui è stato effettuato il calcolo del documento tecnico EPRI. Un altro effetto è attribuibile all'aver deciso di omogeneizzare preliminarmente la regione di combustibile del sistema senza aver considerato gli effetti di autoschermo sul combustibile nella configurazione eterogenea iniziale.

Il confronto tra il caso eterogeneo ed i valori EPRI a 2 e 4 gruppi - utilizzando sempre una geometria con un baffle a 7/8" - viene riportato nella Tab. 6.10:

Tabella 5.10: Confronto valori di sezioni d'urto efficaci SCALE - EPRI caso *eterogeneo*

Sistema het/het						
7/8"	Baffle			Acqua		
2 Gruppi						
	EPRI	SCALE	var_rel	EPRI	SCALE	var_rel
	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]
Σ _{a1}	4.77E-03	4.39E-03	-8.0	4.93E-04	6.14E-04	-19.8

Σ_{a2}	1.49E-01	1.39E-01	-6.7	-	1.93E-02	-
D_1	0.85	1.08	26.6	1.7	1.89	-9.9
D_2	0.28	0.33	17.9	-	0.27	-
4 Gruppi						
Σ_{a1}	1.30E-03	1.36E-03	4.6	1.76E-04	2.58E-04	-31.8
Σ_{a2}	1.06E-03	6.23E-04	-41.3	1.44E-05	1.38E-05	4.4
Σ_{a3}	1.24E-02	1.07E-02	-13.3	1.25E-03	1.32E-03	-5.1
Σ_{a4}	1.49E-01	1.38E-01	-7.1	-	1.93E-02	-
D_1	1.25	1.78	42.6	2.46	4.06	-39.4
D_2	0.81	1.24	52.8	1.63	1.42	15.1
D_3	0.34	0.37	8.1	0.88	0.79	12.0
D_4	-	0.33	-	-	0.28	-

Si è anche operato un calcolo di confronto rispetto ai risultati proposti dall'EPRI, per il solo caso omogeneo, delle configurazioni in cui le dimensioni lineari del baffle sono 9/8" e 11/8".

Tabella 5.11: confronto valore delle sezioni d'urto efficaci SCALE/EPRI - caso 9/8"

9/8"	Baffle			Acqua		
2 Gruppi						
	EPRI	SCALE	var_rel	EPRI	SCALE	var_rel
	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]
Σ _{a1}	4.77E-03	4.45E-03	-6.6	4.93E-04	1.38E-03	-64.4
Σ _{a2}	1.40E-01	1.32E-01	-6.1	-	4.04E-02	-
D ₁	0.86	1.01	18.0	1.70	1.66	2.2
D ₂	0.27	0.33	23.2	-	0.28	-
4 Gruppi						
Σ _{a1}	1.30E-03	1.10E-03	-15.5	1.76E-04	2.13E-04	-17.4
Σ _{a2}	1.06E-03	6.87E-04	-35.2	1.44E-05	3.63E-05	-60.3
Σ _{a3}	1.24E-02	1.06E-02	-14.4	1.25E-03	2.96E-03	-57.8
Σ _{a4}	1.40E-01	1.31E-01	-6.5	-	4.04E-02	-
D ₁	1.31	1.80	37.1	2.46	4.03	-39.0
D ₂	0.84	1.18	40.5	1.63	1.42	14.9
D ₃	0.345	0.37	7.8	0.88	0.79	12.0
D ₄	0.27	0.33	23.2	-	0.28	-

Tabella 5.12: confronto valore sezioni d'urto efficaci SCALE/EPRI - caso 11/8"

11/8''	Baffle			Acqua		
2 Gruppi						
	EPRI	SCALE	var_rel	EPRI	SCALE	var_rel
	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[%]
Σ _{a1}	4.77E-03	4.35E-03	-8.9	4.93E-04	1.39E-03	-64.6

Σ_{a2}	1.31E-01	1.29E-01	-1.5	-	4.04E-02	-
D_1	0.88	1.02	15.9	1.70	1.63	4.2
D_2	0.26	0.33	26.9	-	0.28	-
4 Gruppi						
Σ_{a1}	1.30E-03	1.07E-03	-17.9	1.76E-04	2.06E-04	-14.6
Σ_{a2}	1.06E-03	6.83E-04	-35.6	1.44E-05	3.63E-05	-60.3
Σ_{a3}	1.24E-02	1.04E-02	-15.9	1.25E-03	2.96E-03	-57.7
Σ_{a4}	1.31E-01	1.28E-01	-2.0	-	4.04E-02	-
D_1	1.36	1.80	32.2	2.46	4.00	-38.4
D_2	0.86	1.19	37.8	1.63	1.42	15.0
D_3	0.35	0.37	6.3	0.88	0.79	12.0
D_4	0.26	0.33	28.3	-	0.28	-

In ultimo, si riportano due diagrammi di confronto dei profili di flusso termico e veloce nella zona di mezzeria del sistema omogeneo combustibile/riflettore per le tre configurazioni geometriche analizzate nel rapporto RISOM.

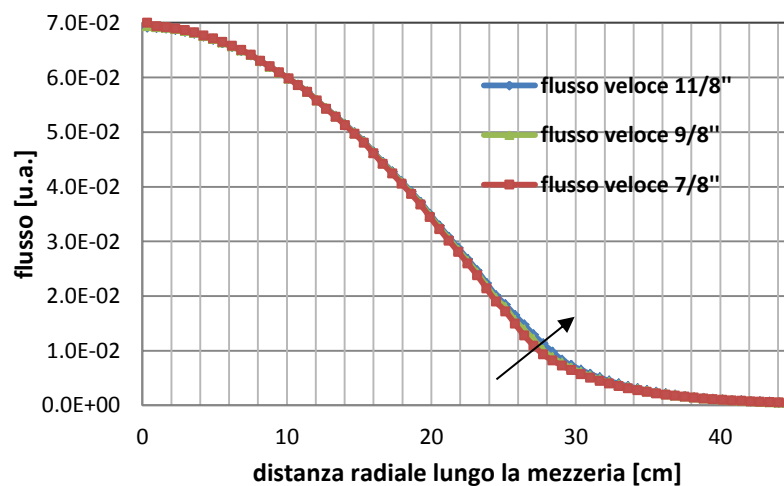


Figura 5.33: profili di flusso veloce sistema *omogeneo* - casi 7/8", 9/8", 11/8"

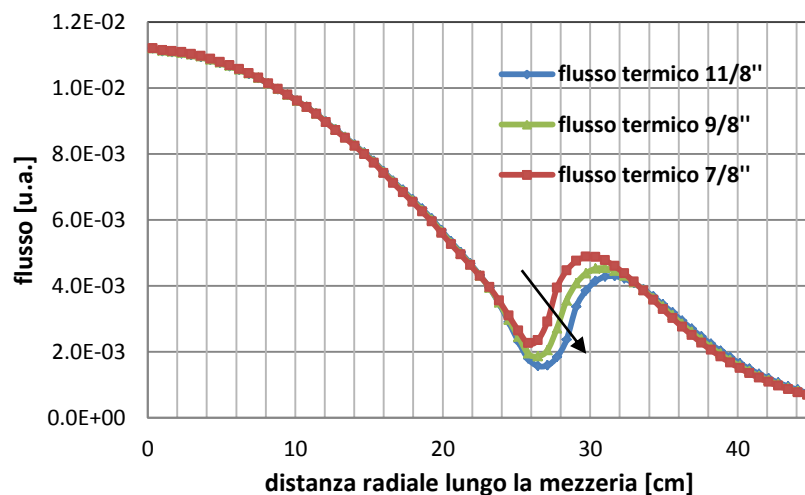


Figura 5.34: profili di flusso termico sistema *omogeneo* - casi 7/8", 9/8", 11/8"

Le Fig. 5.33 e 5.34 mostrano che, nell'intorno della zona del baffle, un aumento dello spessore del baffle comporta una riduzione del flusso termico ed un leggero aumento di quello veloce. Tale comportamento è da attribuirsi alla circostanza fisica che l'aumento dello spessore d'acciaio comporta da una parte la riduzione della zona di moderazione, con conseguente riduzione degli effetti di downscattering dei neutroni veloci verso i termici, e dall'altra un aumento dell'assorbimento dei neutroni termici. L'azione combinata dei due fenomeni fisici appena descritti comporta uno spostamento verso il basso e verso destra del picco termico nella zona di riflessione.

5.4 Il riflettore ENEA (2011)

Nel 2011 il gruppo di ricerca sui dati nucleari dell'ENEA di Bologna produsse un rapporto tecnico nel quale presentò la realizzazione di una libreria (BUGJEFF311.BOLIB) gruppo-mediata di neutroni e fotoni ($47\text{ n} + 20\text{ }\gamma$) utilizzabile per calcoli di schermaggio e dosimetria sul vessel di un reattori LWR e basata sulla JEFF-3.1.1 presente sulla banca dati nucleari della OECD-NEA. La BUGJEFF311.BOLIB è stata prodotta attraverso il collassamento delle sezioni d'urto della libreria a gruppi fini VITJEFF311.BOLIB realizzata dall'ENEA-Bologna [15].

Lo spettro del flusso neutronico necessario per collassare la libreria VITJEFF311.BOLIB è stato valutato adottando un modello monodimensionale di PWR e BWR secondo quanto riportato nelle Fig. 5.35 e 5.36.

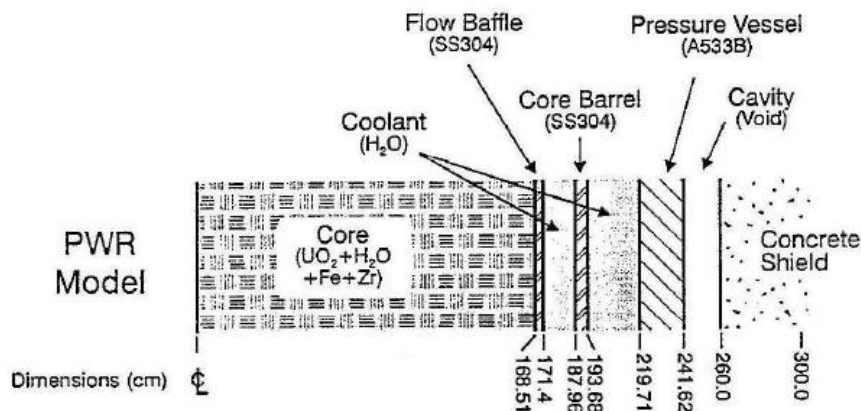


Figura 5.35: modello PWR per i calcoli di collassamento - ENEA

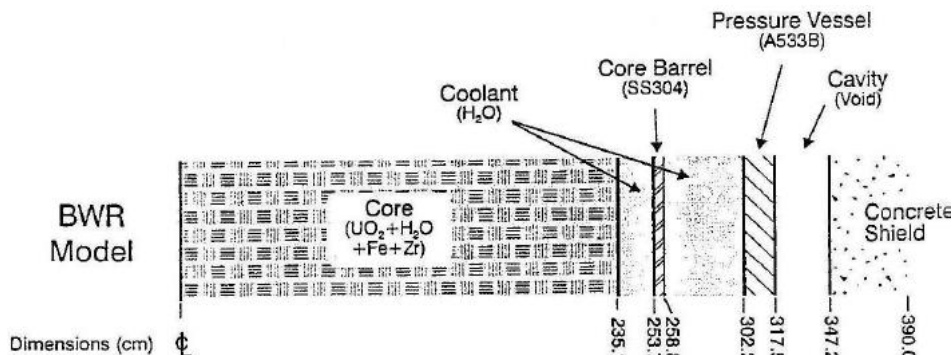


Figura 5.36: modello BWR per i calcoli di collassamento - ENEA

Si è quindi deciso di realizzare il calcolo delle sezioni d'urto efficaci secondo le configurazioni proposte dal rapporto e riportata nelle Fig. 5.36-37 che adottano entrambe una configurazione di combustibile eterogenea, ma prevedono l'accoppiamento combustibile/riflettore con un assembly 17x17 per il caso del PWR e con un assembly 9x9-8 per il caso del BWR. La modellizzazione delle due configurazioni è stata realizzata, per la zona del riflettore, sino al vessel. Le densità atomiche, le abbondanze isotopiche, le condizioni geometriche e quelle operative utilizzate nel calcolo col codice di riferimento sono riportate nella Tab. 5.13.

Tabella 5.13: condizioni geometriche, materiali ed operative - ENEA

Parametro	BWR	PWR
Geometria	[cm]	[cm]
Raggio interno clad	0.53213	0.41783
Raggio esterno clad	0.6134	0.47498
Raggio esterno cella	0.9174	0.71079
Regioni di temperatura	[K]	[K]
Pellet	921	921
Clad	672	672
Moderatore	551	583
Densità atomica pellet	[atom/b.cm]	[atom/b.cm]
U-235	4.959E-04	6.325E-04
U-238	2.177E-02	2.166E-02
O	4.455E-02	4.465E-02
Densità moderatore	[atom/b.cm]	[atom/b.cm]
H	2.475E-02	4.174E-02
O	1.238E-02	2.357E-02
B-10	0.000E+00	4.200E-06
Densità Zircaloy-4	[atom/b.cm]	[atom/b.cm]
Cr	7.640E-05	7.640E-05
Fe	1.450E-04	1.450E-04
Ni	8.770E-04	8.770E-04
Zr	4.270E-02	4.270E-02

Le densità atomiche riportate in Tab. 6.11 corrispondono ad un arricchimento pari al 2.88 wt% di U-235 ed una concentrazione di boro pari a 537 ppm per la configurazione PWR, ed un arricchimento pari al 2.25 wt% di U-235 per la configurazione BWR.

La valutazione delle sezioni d'urto efficaci è stata effettuata con SCALE 6.1.3 utilizzando le opzioni di calcolo discusse nel capitolo 5. La simmetria del sistema ha permesso di ridurre i costi tempo-computazionali attraverso la modellizzazione di $\frac{1}{4}$ del sistema.

5.4.1 Configurazione PWR

Il calcolo della configurazione PWR è stato realizzato utilizzando le opzioni di calcolo discusse precedentemente. Le Fig. 5.36 e 5.37 riportano la distribuzione delle mesh computazionali e la distribuzione dei materiali per come realizzata dal codice di riferimento.

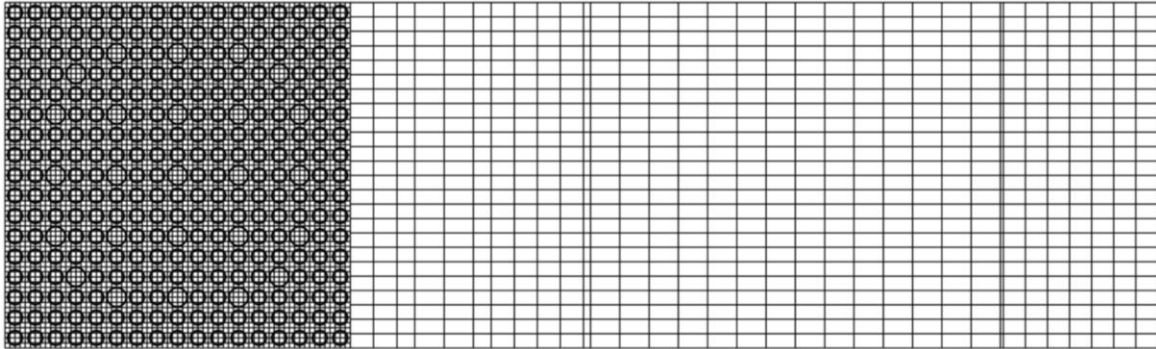


Figura 5.37: griglia computazionale sistema assembly/riflettore – PWR

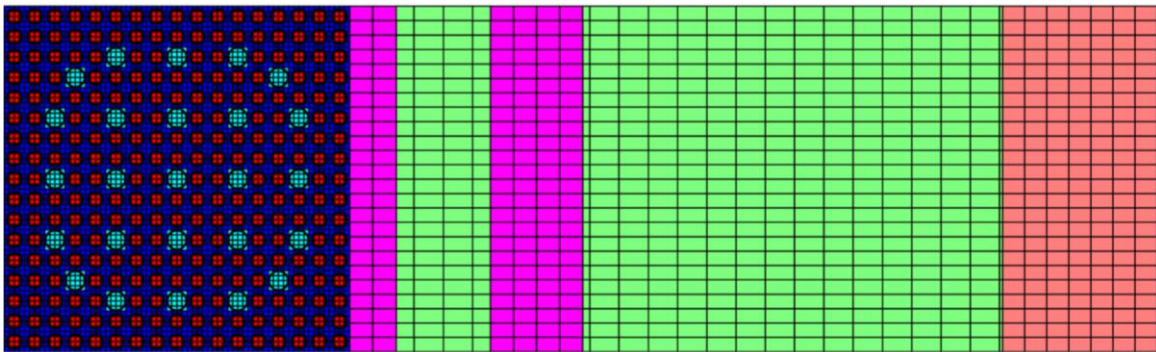


Figura 5.38: disposizione dei materiali sistema assembly/riflettore – PWR

La risposta del codice in termini di mappe e profili di flusso termico e veloce viene riportata nelle Fig. 5.39-42.

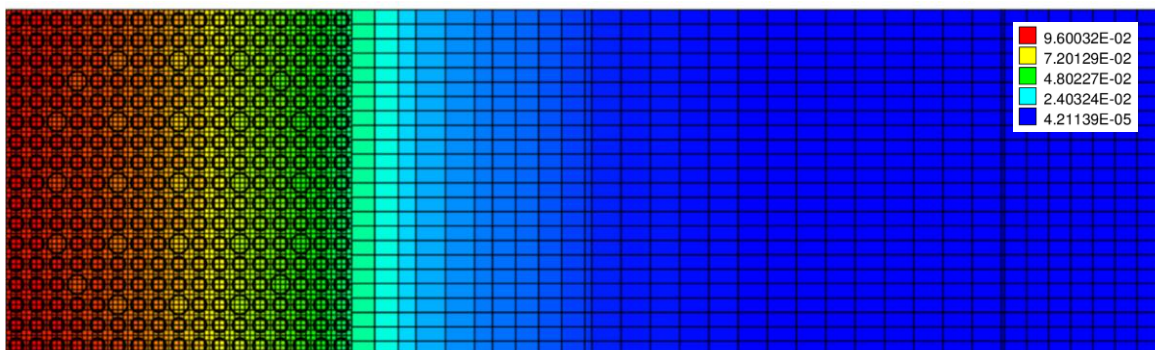


Figura 5.39: mappa di flusso veloce sistema assembly/riflettore – PWR

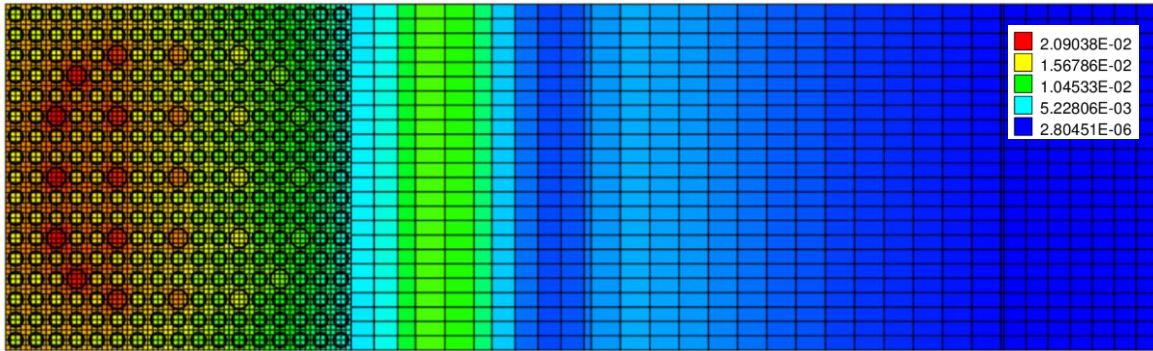
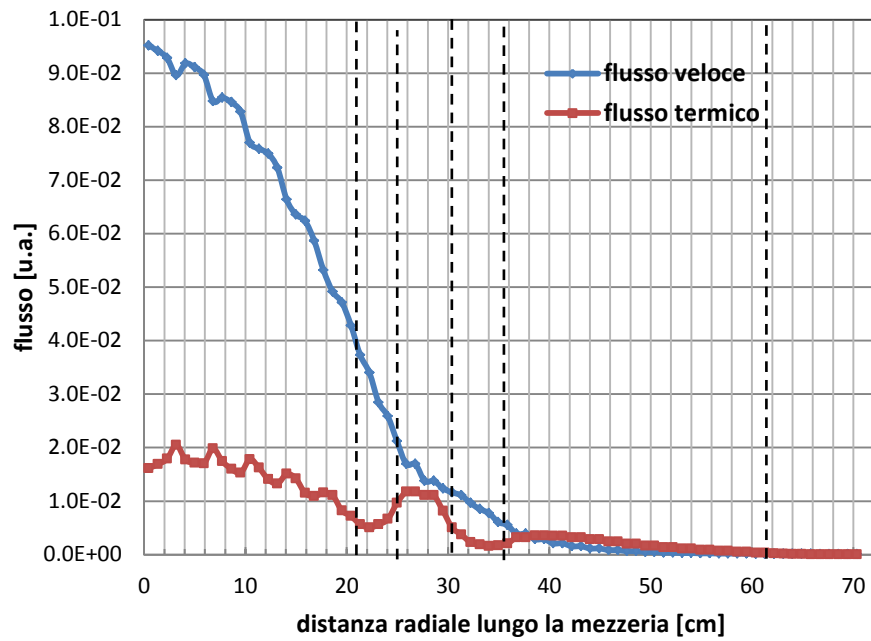
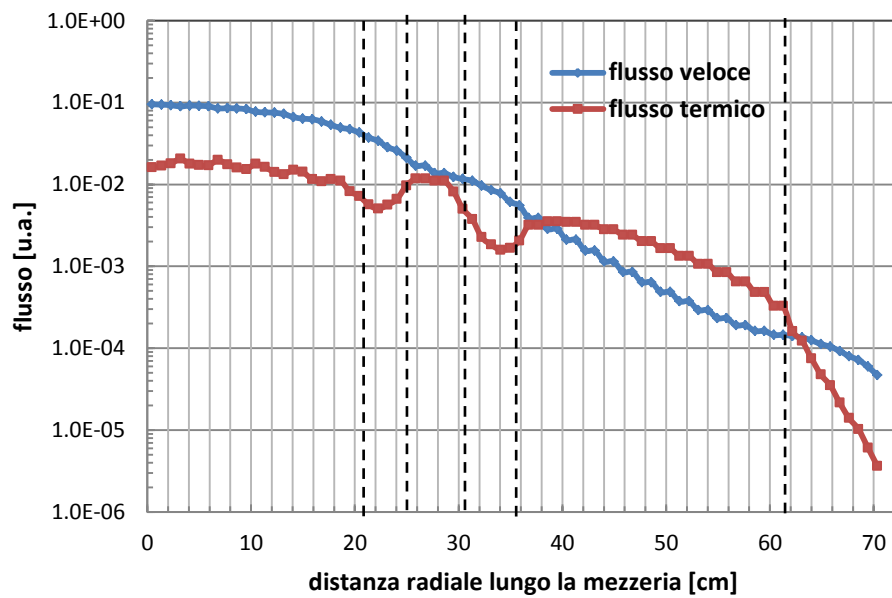


Figura 5.40: mappa di flusso termico sistema assembly/riflettore – PWR


 Figura 5.41: profilo di flusso termico e veloce (*lin/lin*) – PWR

 Figura 5.42: profilo di flusso termico e veloce (*log/lin*) – PWR

5.4.2 Configurazione BWR

Il calcolo della configurazione BWR è stato eseguito adottando una densità del moderatore pari a 0.370 g/cm³ ed utilizzando la distribuzione delle mesh computazionali e dei materiali presentata nelle Fig. 5.43 e 5.44.

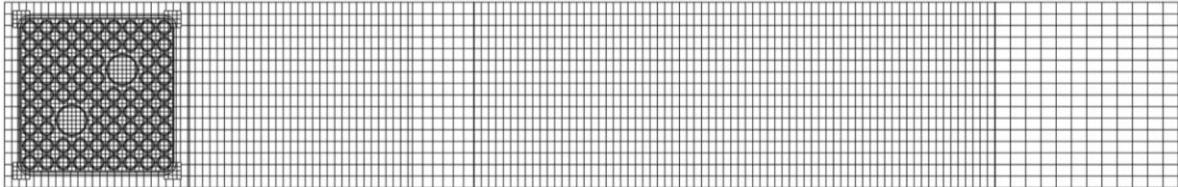


Figura 5.43: griglia computazionale sistema assembly/riflettore – BWR

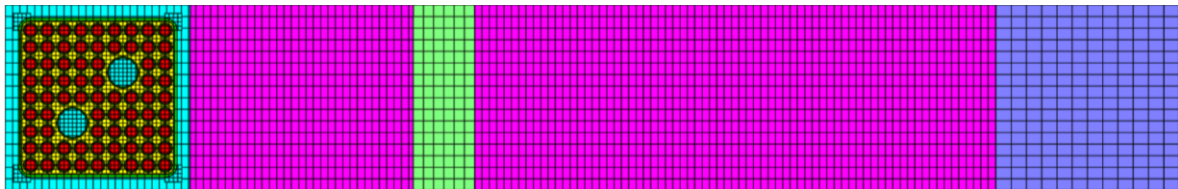


Figura 5.44: disposizione dei materiali sistema assembly/riflettore – BWR

I risultati ottenuti per le due configurazioni studiate, in termini di mappe e profili di flusso, vengono riportati nelle Fig. 5.45-46.

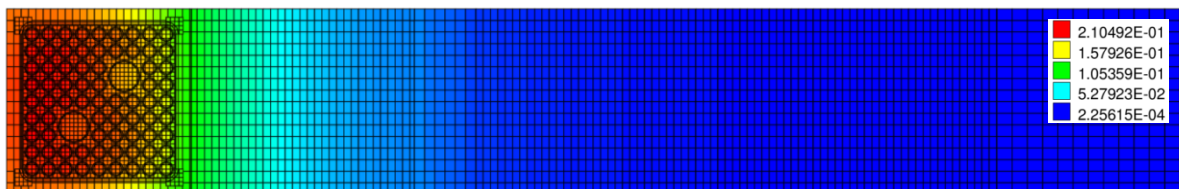


Figura 5.45: mappa di flusso veloce sistema assembly/riflettore – BWR

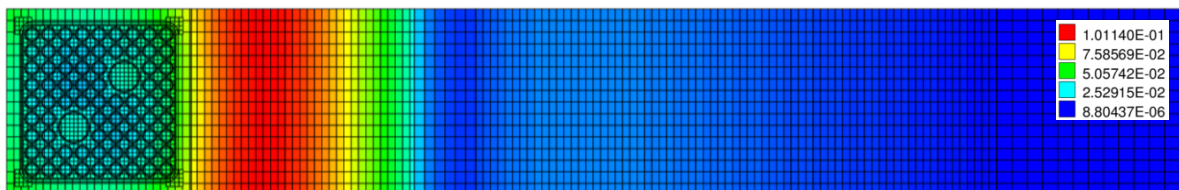
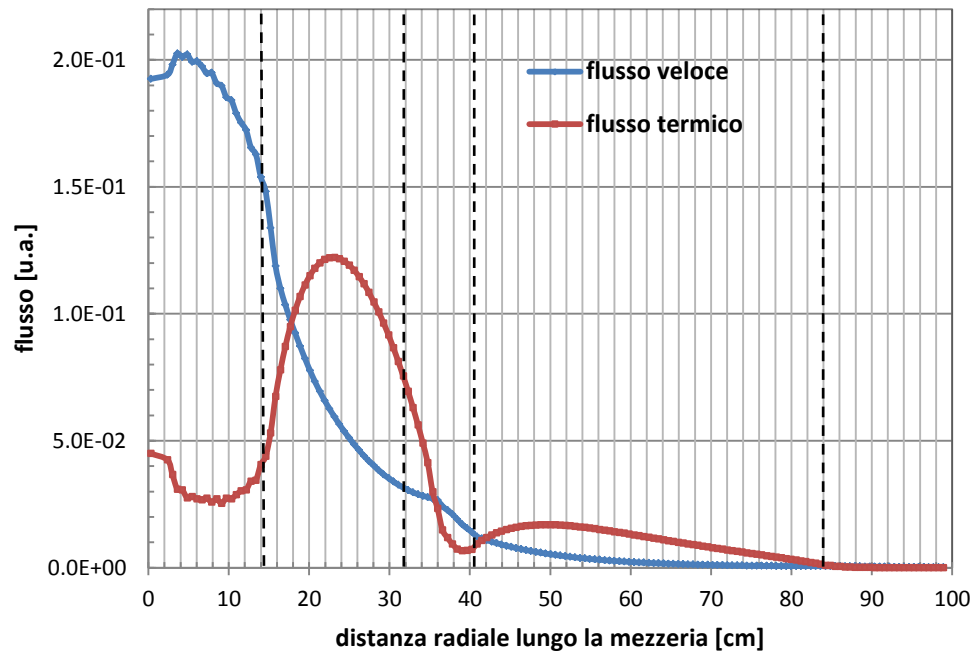
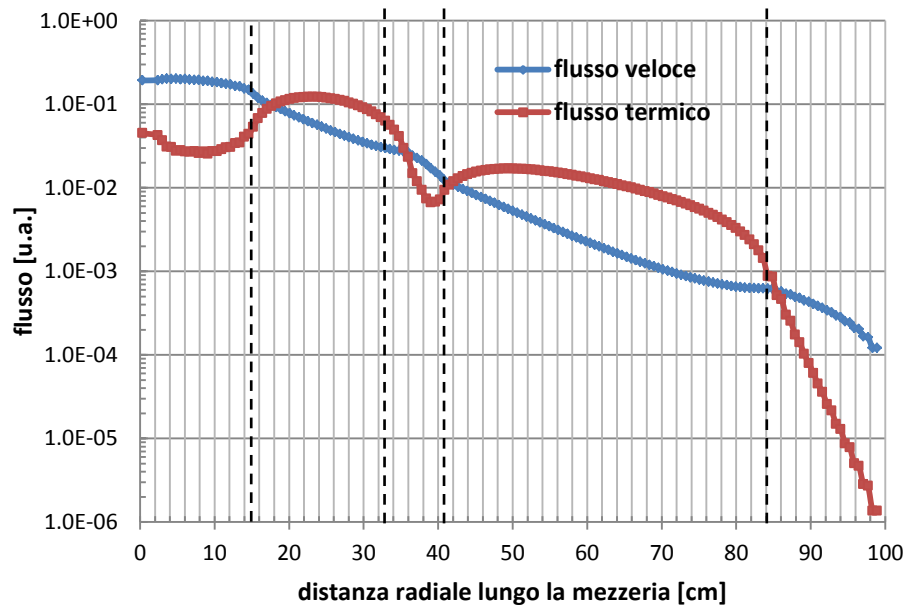


Figura 5.46: mappa di flusso termico sistema assembly/riflettore – BWR

Il risultato dell'andamento del flusso termico e veloce sulla linea di simmetria viene riportato nelle Fig. 5.47 e 5.48.


 Figura 5.47: profilo di flusso termico e veloce (*lin/lin*) – BWR

 Figura 5.48: profilo di flusso termico e veloce (*log/lin*) - BWR

I risultati ottenuti in termini di sezioni d'urto efficaci omogenee condensate a due gruppi per le configurazioni BWR e PWR studiate sono riportate nella Tab. 5.14.

Tabella 5.14: sezioni d'urto efficaci configurazioni BWR e PWR - SCALE 6.1.3

	Assembly		Riflettore	
	BWR	PWR	BWR	PWR
	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[cm ⁻¹]
Σ_{a1}	6.23E-03	1.01E-02	6.56E-04	2.61E-03

Σ_{a2}	4.47E-02	8.77E-02	9.89E-03	7.66E-02
Σ_{f1}	1.66E-03	2.73E-03	0.00E+00	0.00E+00
Σ_{f2}	2.92E-02	5.75E-02	0.00E+00	0.00E+00
Σ_{1-2}	8.21E-03	1.51E-02	2.20E-02	1.42E-02
Σ_{2-1}	7.33E-04	1.62E-03	1.88E-04	1.94E-03
Σ_{tot1}	3.54E-01	5.20E-01	3.91E-01	5.92E-01
Σ_{tot2}	8.00E-01	1.25E+00	1.01E+00	1.40E+00
$\nu\Sigma_{f1}$	4.30E-03	6.97E-03	0.00E+00	0.00E+00
$\nu\Sigma_{f2}$	7.13E-02	1.40E-01	0.00E+00	0.00E+00
D_1	1.92	1.51	2.67	1.31
D_2	0.60	0.40	0.50	0.31
Σ_{tr1}	1.74E-01	2.21E-01	1.25E-01	2.54E-01
Σ_{tr2}	5.55E-01	8.39E-01	6.61E-01	1.06E+00
ϕ_1	1.71E-01	7.44E-02	1.51E-02	2.55E-02
ϕ_2	4.11E-02	1.39E-02	2.65E-02	5.56E-03

5.5 - Il Riflettore BEAVRS (2013)

Nel 2013 il gruppo di fisica del reattore computazionale del MIT (Massachusetts Institute of Technology) propose il benchmark BEAVRS (Benchmark for Evaluation And Validation of Reactor Simulation) per la valutazione e la validazione di simulazioni di reattori nucleari che presentasse, rispetto a benchmark precedenti, una descrizione altamente dettagliata del PWR con due cicli di dati di misure operazionali che possono essere utilizzati per validare con alta affidabilità i metodi di analisi del nocciolo [16]. Si è quindi deciso di utilizzare i dati presenti nel benchmark per realizzare calcoli di sezioni d'urto efficaci di riflettore col codice di riferimento (SCALE 6.1.3). I risultati ottenuti sono stati confrontati con altri provenienti da un'analisi col codice HELIOS¹. Il BEAVRS effettua l'analisi su un nocciolo PWR la cui sezione trasversale radiale viene riportata nella Fig. 5.49.

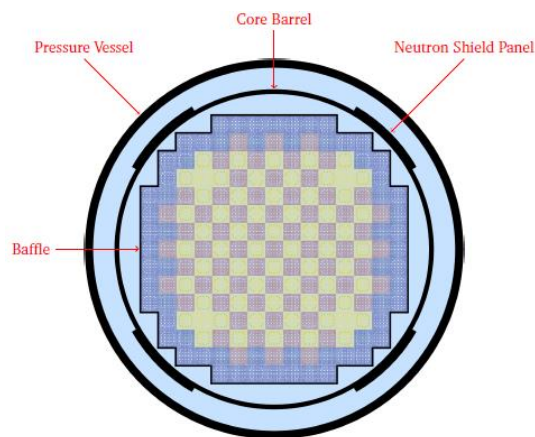


Figura 5.49: modellizzazione del nocciolo - Benchmark BEAVRS

¹ Si ringrazia l'Ing. Francesco Lodi per aver fornito il risultato dei calcoli da lui realizzati sul benchmark BEAVRS col codice HELIOS.

La Fig. 5.48 si riferisce ad un nocciolo la cui distribuzione del tipo di assembly si riferisce al primo ciclo di funzionamento. Le parti in nero sono costituite da acciaio inossidabile, quelle in azzurro da acqua, quelle in rosso giallo e blu denotano regioni con un arricchimento pari, rispettivamente, a 1.6, 2.4 e 3.1 w/o in U235. Gli assembly di combustibile presenti nel nocciolo sono stati definiti con le seguenti caratteristiche dimensionali e materiali:

Tabella 5.15: parametri assembly di combustibile - BEAVRS

Parametri Assembly	
Passo assembly [cm]	21.50364
Passo pin [cm]	1.25984
Configurazione assembly	17x17
Numero barre di combustibile	264
Numero di tubi guida	24
Numero di tubi strumentali	1

La disposizione della tipologia di assembly nel nocciolo viene specificata dal benchmark attraverso la seguente rappresentazione:

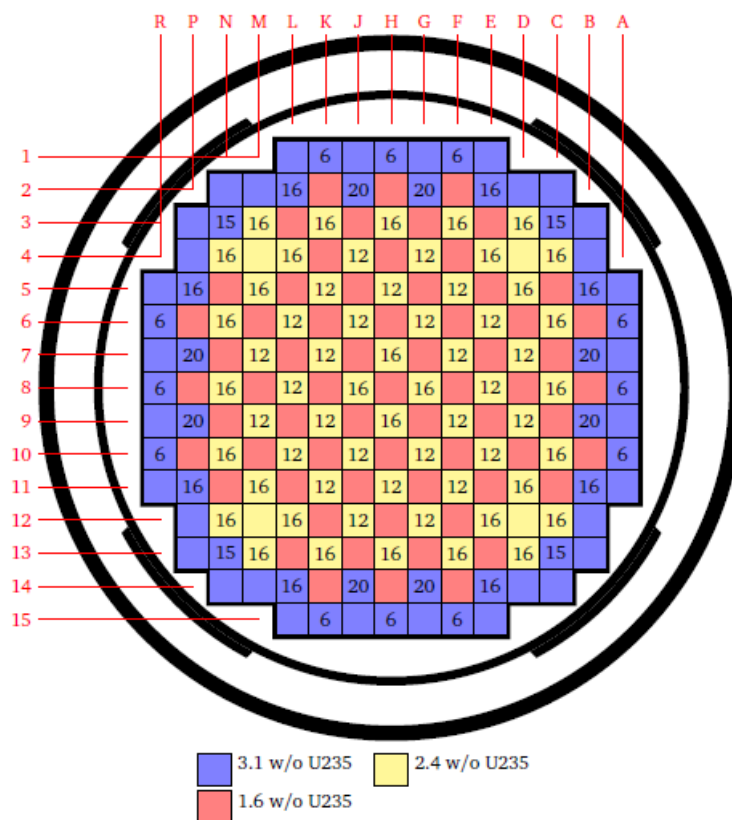


Figura 5.50: disposizione degli assembly nel nocciolo - ciclo 1

L'assembly periferico, utilizzato per il calcolo, è costituito da un arricchimento del 3.1 w/o in U235 ed è presente in due configurazioni: una standard ed una con 6 pin di assorbiteore bruciabile (borosilicato). Le caratteristiche dimensionali e i materiali presenti nella pin di combustibile e nel tubo guida vengono riportate nelle tabelle seguenti:

Tabella 5.16: geometria e materiali pin di combustibile - BEARS

Pin di combustibile		
Parametro	[cm]	Materiale
raggio fuel	0.39218	UO2
raggio clad	0.40005	Elio
enr	3.1 w/o	Zircaloy

La composizione atomica dei materiali costituenti la pin di combustibile viene riportata nelle Tab. 5.17-19.

Tabella 5.17: composizione atomica UO2 - 3.1 w/o

UO2 3.1 % enr	
Densità [g/cc]	10.30166
Isotope	Densità [atom/b.cm]
U-234	5.799E-06
U-235	7.218E-04
U-238	2.225E-02
O-16	4.585E-02
O-17	1.747E-05
O-18	9.422E-05

Tabella 5.18: composizione atomica elio

Elio	
Densità [g/cc]	0.001598
Isotope	Densità [atom/b.cm]
HE-4	2.4044e-04

Tabella 5.19: composizione atomica zircaloy-4

Zircaloy-4	
Densità [g/cc]	6.55
Isotope	Densità [atom/b-cm]
O-16	3.074E-04
O-17	1.171E-07
O-18	6.318E-07
Cr-50	3.296E-06
Cr-52	6.356E-05
Cr-53	7.208E-06
Cr-54	1.794E-06
Fe-54	8.670E-06
Fe-56	1.361E-04
Fe-57	3.143E-06
Fe-58	4.183E-07
Zr-90	2.183E-02
Zr-91	4.760E-03
Zr-92	7.276E-03

Zr-94	7.373E-03
Zr-96	1.188E-03
Sn-112	4.674E-06
Sn-114	3.180E-06
Sn-115	1.638E-06
Sn-116	7.006E-05
Sn-117	3.700E-05
Sn-118	1.167E-04
Sn-119	4.139E-05
Sn-120	1.570E-04
Sn-122	2.231E-05
Sn-124	2.790E-05

Le caratteristiche geometriche del tubo guida, del tubo strumentale e della pin di borosilicato, come specificate dal benchmark, sono riportate nelle figure e tabelle seguenti:

Tabella 5.20: composizione geometrica tubo guida

Tubo guida		
Parametro	[cm]	Materiale
raggio interno [cm]	0.56134	H ₂ O
raggio esterno [cm]	0.60198	Zircaloy

Tabella 5.21: composizione geometrica tubo strumentale

Tubo strumentale		
Parametro	[cm]	Materiale
raggio interno [cm]	0.43688	Aria
raggio esterno [cm]	0.48387	Zircaloy

Tabella 5.22: composizione geometrica pin di borosilicato

Pin di borosilicato		
Dati	[cm]	materiale
raggio int.	0.21400	ss304
raggio est.	0.24130	
raggio int.	0.24130	vetro borosilicato
raggio est.	0.42672	
raggio int.	0.42672	ss304
raggio est.	0.48387	
raggio int.	0.48387	acqua
raggio est.	0.56134	
raggio int.	0.56134	Zircaloy
raggio est.	0.60198	

La composizione dei materiali costituenti la pin di combustibile viene riportata nelle seguenti tabelle:

Tabella 5.23: composizione acqua borata

Acqua borata boro 975 ppm	
Densità [g/cc]	0.740582
Isotopo	Densità [atom/b.cm]
B-10	7.134E-06
B-11	2.871E-05
H-1	1.470E-02
H-2	1.691E-06
O-16	7.329E-03
O-17	2.794E-06
O-18	1.471E-05

Tabella 5.24: composizione aria

Aria	
Densità [g/cc]	0.000616
Isotope	Densità [atom/b.cm]
C-12	6.7565E-09
C-13	7.307E-011
O-16	5.2864E-06
O-17	2.1037E-09
O-18	1.0863E-08
N-14	1.9861E-05
N-15	7.1900E-08
Ar-36	7.9414E-10
Ar-38	1.4915E-10
Ar-40	2.3506E-07

Le caratteristiche geometriche e materiali della zona del riflettore sono state dedotte dai dati presenti nel benchmark e riportati nella Tab. 5.25:

Tabella 5.25: composizione geometrica e materiale del riflettore

Riflettore			
Elemento strutturale	Parametro	Dimensioni [cm]	Materiale
Baffle	Spessore	2.22250	SS304
Barrel	Raggio interno	187.960	SS304
	Raggio esterno	193.675	
Schermo neutronico	Raggio esterno	199.39	SS304
	estensione	30° - 45°	
Vessel	Raggio interno	230.0	Acciaio al carbonio
	Raggio esterno	251.9	

5.5.1 Risultati

Il calcolo con SCALE 6.1.3 è stato realizzato adottando una configurazione operativa di HZP (543.15 K), una densità del moderatore pari a 0.660 g/cm^3 ed una concentrazione di boro pari a 975 ppm. Le opzioni di calcolo sono identiche a quelle scelte per la simulazione delle altre configurazioni esposte nei precedenti paragrafi. Per poter operare un confronto con i dati ottenuti con il codice di cella HELIOS, il collassamento - a partire da una libreria a 278 gruppi - è stato realizzato con una distribuzione ad 8 gruppi la cui scansione energetica è riportata in Tab. 5.26.

Tabella 5.26: discretizzazione energetica delle librerie di sezioni d'urto ad 8 gruppi

	HELIOS		NEWT		
8 gruppi	Energia		Energia		var_rel
[-]	[eV]		[eV]		[%]
	max	min	max	min	
1	2.000E+07	2.231E+06	2.000E+07	2.354E+06	-5.21
2	2.231E+06	8.209E+05	2.354E+06	8.200E+05	0.10
3	8.209E+05	9.119E+03	8.209E+05	9.500E+03	-4.01
4	9.119E+03	1.301E+02	9.500E+03	1.220E+02	6.61
5	1.301E+02	3.928E+00	1.220E+02	4.000E+00	-1.80
6	3.928E+00	6.251E-01	4.000E+00	6.250E-01	0.01
7	6.251E-01	1.457E-01	6.250E-01	1.500E-01	-2.85
8	1.457E-01	1.000E-04	1.500E-01	1.000E-04	0.00

La tabella presenta, inoltre, il confronto con la scansione energetica operata da HELIOS per il collassamento. La variazione relativa percentuale è stata calcolata rispetto all'energia minima per ogni gruppo scegliendo come riferimento NEWT.

Nelle Fig. 5.51 e 5.52 vengono riportate la rappresentazione delle mesh computazionali e della distribuzione dei materiali per come realizzate da SCALE 6.3.1.

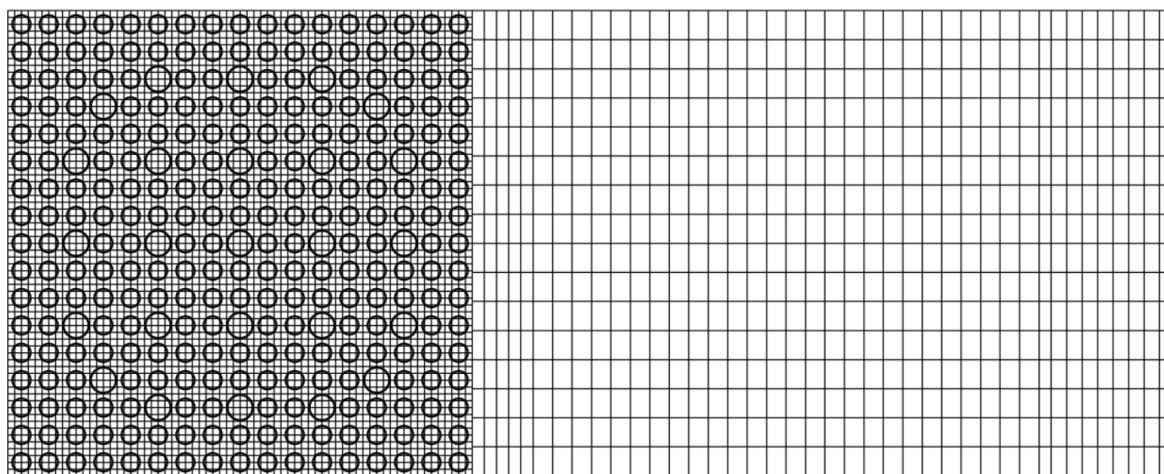


Figura 5.51: mesh computazionali – BEARS

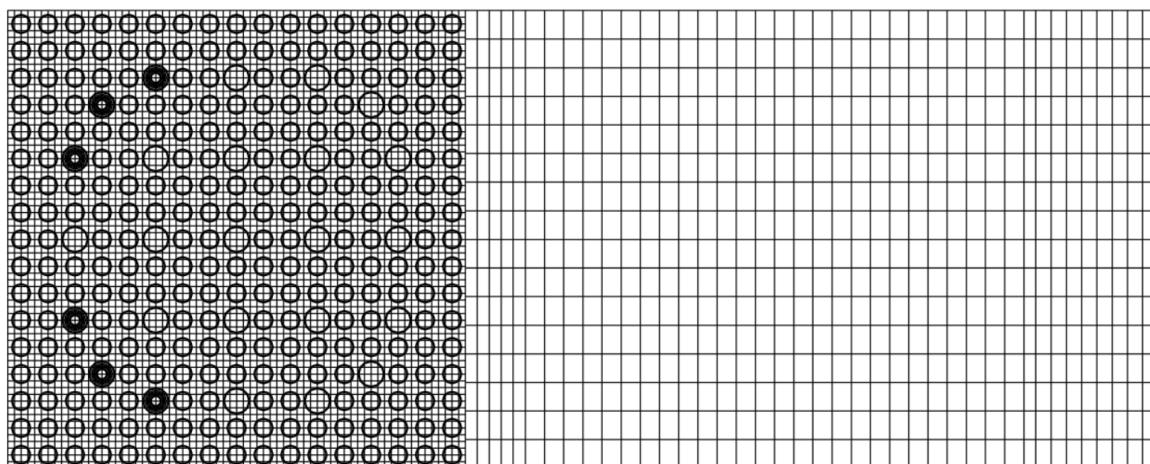


Figura 5.52: mesh computazionali con borosilicato – BEAVRS

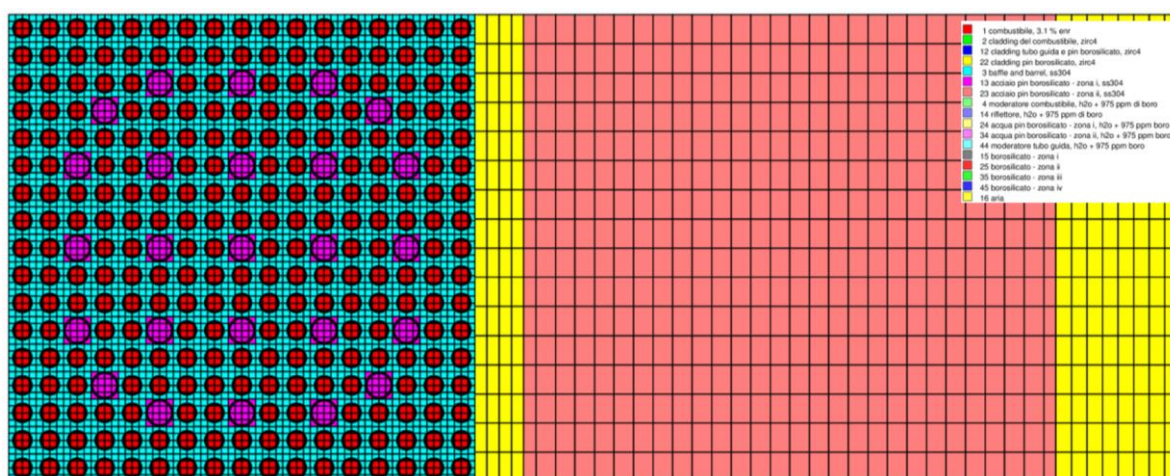


Figura 5.53: distribuzione dei materiali – BEAVRS

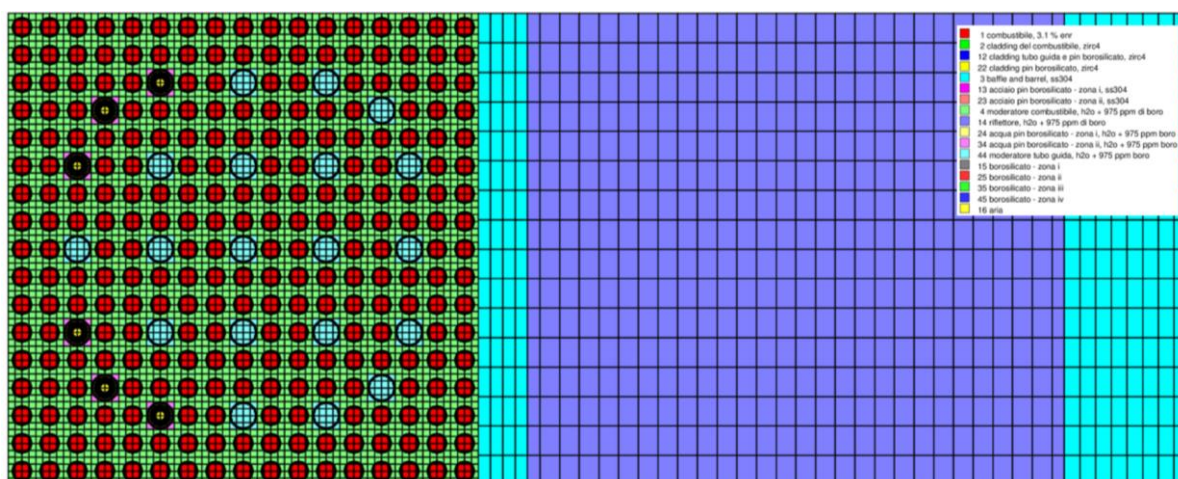


Figura 5.54: distribuzione dei materiali con borosilicato - BEAVRS

A titolo di esempio, si riportano le mappe di flusso del gruppo 1 (zona veloce) e del gruppo 8 (zona termica) ottenuti con SCALE 6.1.3.

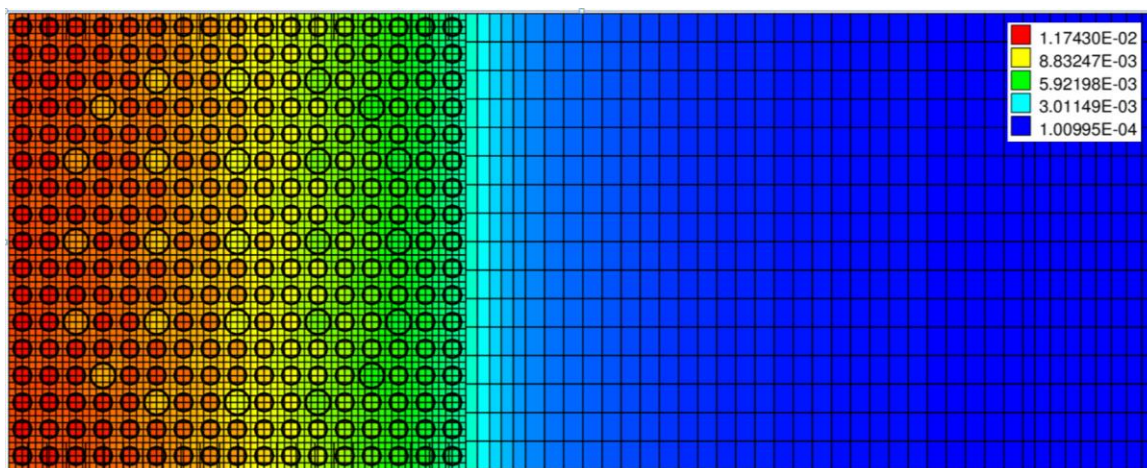


Figura 5.55: mappa di flusso veloce - gruppo 1

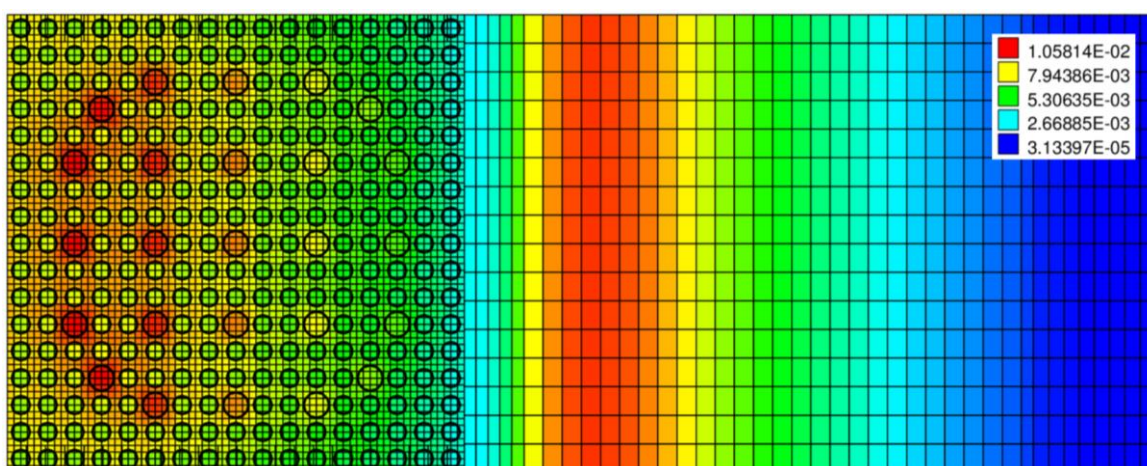


Figura 5.56: mappa di flusso termico - gruppo 8

I risultati ottenuti, per i quali sono disponibili i dati di confronto con HELIOS, sono riportati nella Tab. 5.27.

Tabella 5.27: sezioni d'urto efficaci – BEARS

	Assembly standard			Assembly con borosilicato		
	HELIOS	NEWT	Var _{rel}	HELIOS	NEWT	Var _{rel}
	Riflettore		[%]	Riflettore		[%]
Σ_{a1}	1.53E-03	1.44E-03	-6.2	1.53E-03	1.43E-03	-6.9
Σ_{a2}	1.67E-04	1.41E-04	-15.5	1.67E-04	1.40E-04	-16.5
Σ_{a3}	3.45E-04	2.41E-04	-30.1	3.45E-04	2.36E-04	-31.5
Σ_{a4}	1.80E-03	9.98E-04	-44.6	1.80E-03	9.85E-04	-45.3
Σ_{a5}	4.38E-03	3.03E-03	-30.8	4.38E-03	3.04E-03	-30.7
Σ_{a6}	1.56E-02	1.27E-02	-18.8	1.56E-02	1.28E-02	-17.8
Σ_{a7}	3.02E-02	2.22E-02	-26.6	3.02E-02	2.23E-02	-26.2
Σ_{a8}	5.13E-02	3.86E-02	-24.8	5.13E-02	3.84E-02	-25.3
Σ_{tr1}	1.16E-01	9.88E-02	-14.6	1.16E-01	9.80E-02	-15.3

Σ_{tr2}	1.61E-01	1.36E-01	-15.5	1.61E-01	1.35E-01	-15.8
Σ_{tr3}	3.09E-01	2.41E-01	-22.2	3.09E-01	2.41E-01	-22.2
Σ_{tr4}	6.69E-01	5.83E-01	-12.8	6.69E-01	5.82E-01	-13.0
Σ_{tr5}	5.98E-01	5.29E-01	-11.5	5.98E-01	5.28E-01	-11.6
Σ_{tr6}	6.55E-01	5.72E-01	-12.6	6.55E-01	5.74E-01	-12.3
Σ_{tr7}	8.90E-01	8.05E-01	-9.5	8.90E-01	8.06E-01	-9.4
Σ_{tr8}	1.54E+00	1.31E+00	-14.8	1.54E+00	1.31E+00	-14.6

La variazione relativa percentuale è stata calcolata scegliendo come riferimento i dati di HELIOS. Le differenze percentuali tra il 10 ed il 15 percento tra i dati di NEWT ed HELIOS possono essere in generale attribuite ad una diversa modellizzazione del sistema realizzata con i due codici. Infatti, i dati di HELIOS sono da considerarsi come valori medi poiché il calcolo è stato eseguito in riferimento ad 1/8 di nocciolo, mentre in NEWT il calcolo è stato eseguito sul singolo accoppiamento assembly/riflettore. Lo scarto percentuale tra il 30 ed il 40% può essere attribuito all'ulteriore differenza presente nei due codici in riferimento alla diversa discretizzazione energetica operata nel collassamento ad 8 gruppi per come riportato nella Tab. 5.26.

Capitolo 6 – il riflettore GEN III+

In questo capitolo si propongono i risultati ottenuti – in termini di sezioni d’urto efficaci omogeneizzate e condensate a due gruppi – modellizzando un riflettore pesante EPR-like. In particolare, si sono acquisiti i valori delle sezioni d’urto efficaci al variare dell’azimut del sistema nocciolo/riflettore e dunque per tutte le configurazioni geometriche che si incontrano lungo l’intero perimetro del nocciolo. Nella modellizzazione del sistema si è anche realizzato un color-set per analizzare gli effetti bidimensionali presenti nelle zone angolari del sistema nocciolo/riflettore sulle sezioni d’urto efficaci di riflettore. Si è effettuato un calcolo di confronto tra un riflettore PWR standard ed uno pesante. Nel capitolo viene inoltre effettuata un’analisi di sensitività per valutare l’effetto, sulle sezioni d’urto efficaci, dei seguenti parametri: variazione delle mesh computazionali, variazione della concentrazione del boro, variazione delle condizioni operative (HFP-HZP), variazione della temperatura operativa del riflettore, variazione del numero di assembly (2 e 8.5) accoppiati al riflettore, variazione della percentuale di acciaio (da 10% al 100%).

6.1 Il riflettore standard e quello pesante

Si è condotta un’analisi preliminare per verificare, attraverso il codice di riferimento, la diversa risposta neutronica di un riflettore standard e di uno pesante. Per realizzare tale obiettivo, si è scelto di adottare la configurazione presentata nel cap. 5 del PWR TMI-1 al quale è stato sostituito al posto del riflettore standard quello pesante per come è stato modellizzato in un EPR. Si è scelto di condurre la simulazione a condizioni operative di HZP ($T=551$ K) adottando una griglia computazionale con le seguenti caratteristiche dimensionali: unità globale 60x16, assembly 15x15, celle unitarie 4x4, shroud 6x24 e zona di riflettore 36x24. L’assembly, con un arricchimento del 4.85 w/o ha le stesse caratteristiche dimensionali e materiali di quelle specificate nel capitolo 5. Nella Fig. 6.1 e 6.2 viene presentata la distribuzione delle mesh computazionali e dei materiali nella modellizzazione con riflettore standard.

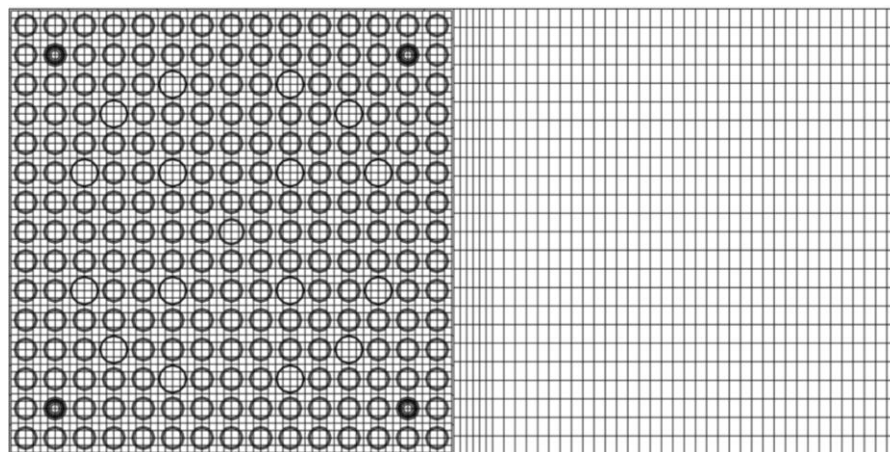


Figura 6.1: mesh computazionale PWR - riflettore standard

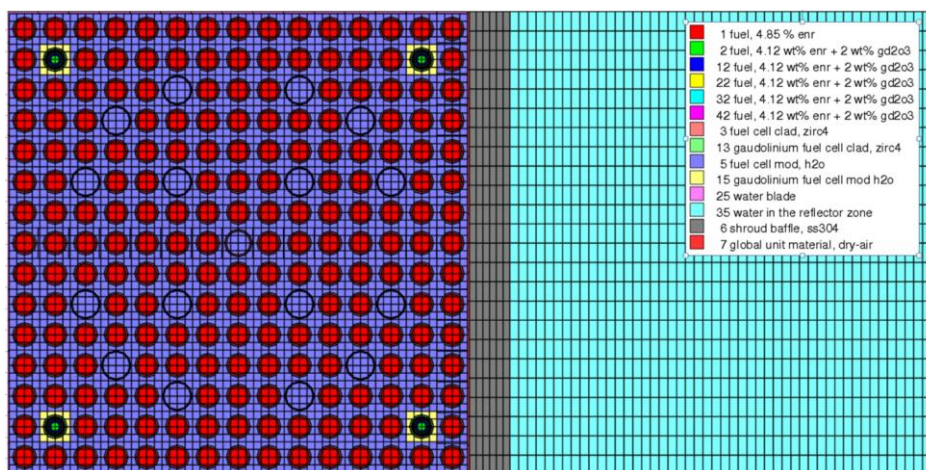


Figura 6.2: distribuzione dei materiali PWR - riflettore standard

Nelle Fig. 6.3 e 6.4 si presenta il risultato ottenuto con SCALE 6.1.3 in termini di mappe di flusso termico e veloce.

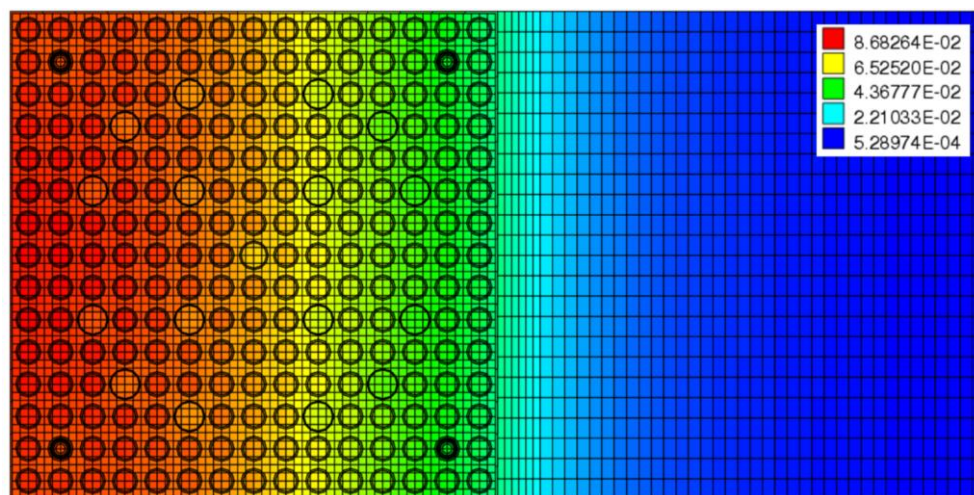


Figura 6.3: mappa di flusso veloce - riflettore standard

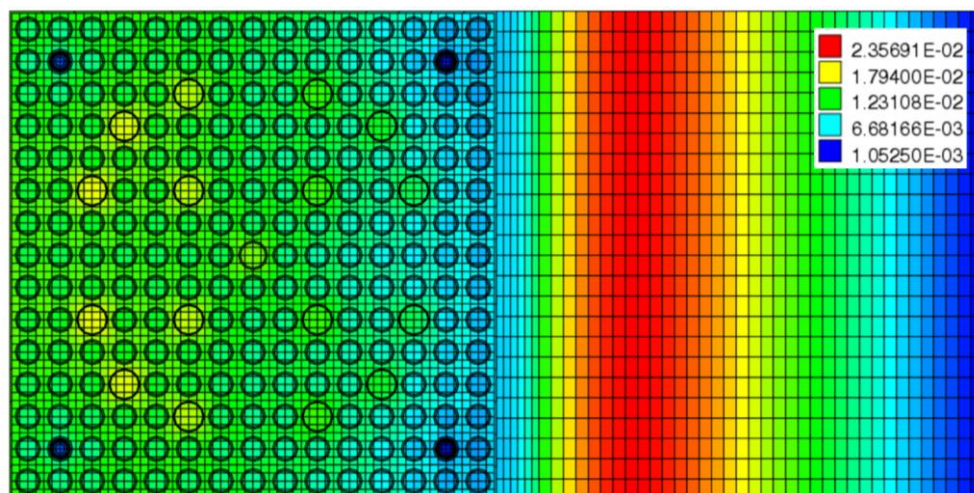


Figura 6.4: mappa di flusso termico - riflettore standard

Il profilo di flusso termico e veloce nella zona di mezzeria viene riportato nella Fig. 6.5

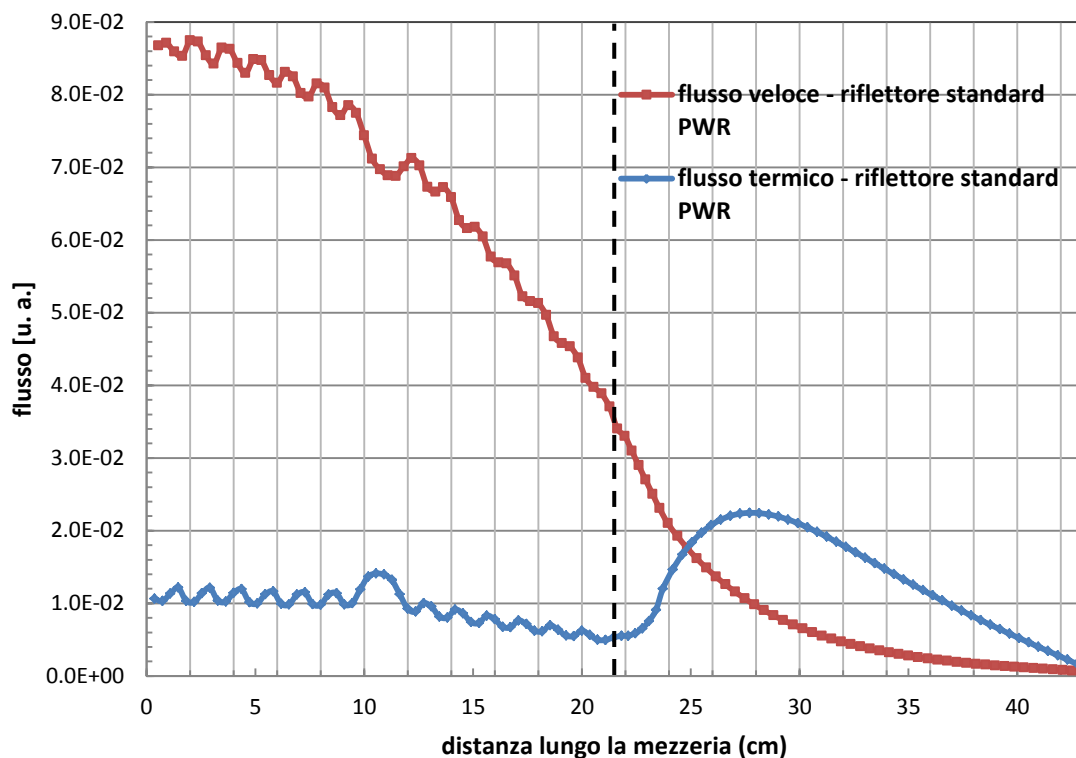


Figura 6.5: profili di flusso termico e veloce PWR - riflettore standard

La modellizzazione del PWR con il riflettore pesante (EPR-like) è stata realizzata utilizzando le stesse opzioni di calcolo adoperate per il riflettore standard. La distribuzione delle mesh computazionali e quella dei materiali realizzate dal codice di riferimento sono riportate nelle Fig. 6.6 e 6.7

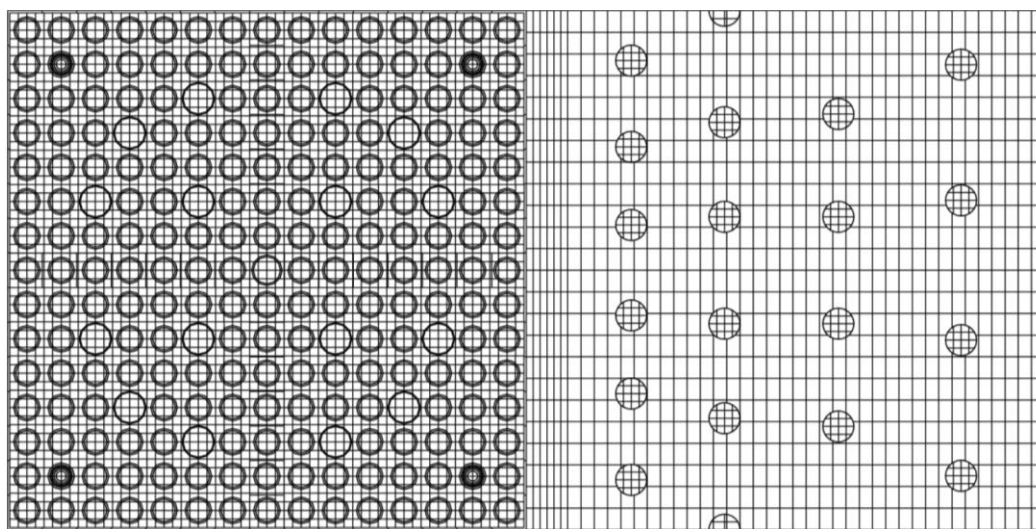


Figura 6.6: mesh computazionali PWR - riflettore pesante

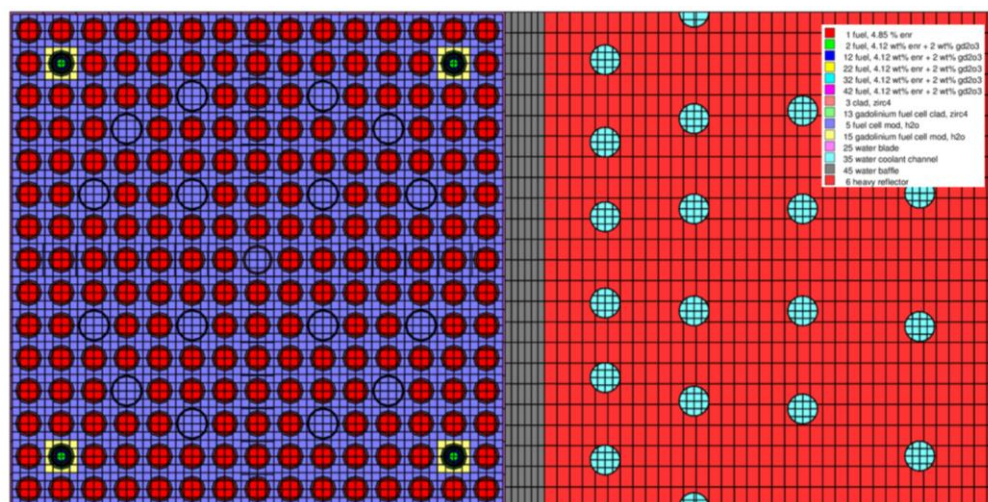


Figura 6.7: distribuzione dei materiali PWR - riflettore pesante

Nelle Fig. 6.8 e 6.9 si presentano i risultati ottenuti con SCALE 6.1.3 in termini di mappe di flusso termico e veloce.

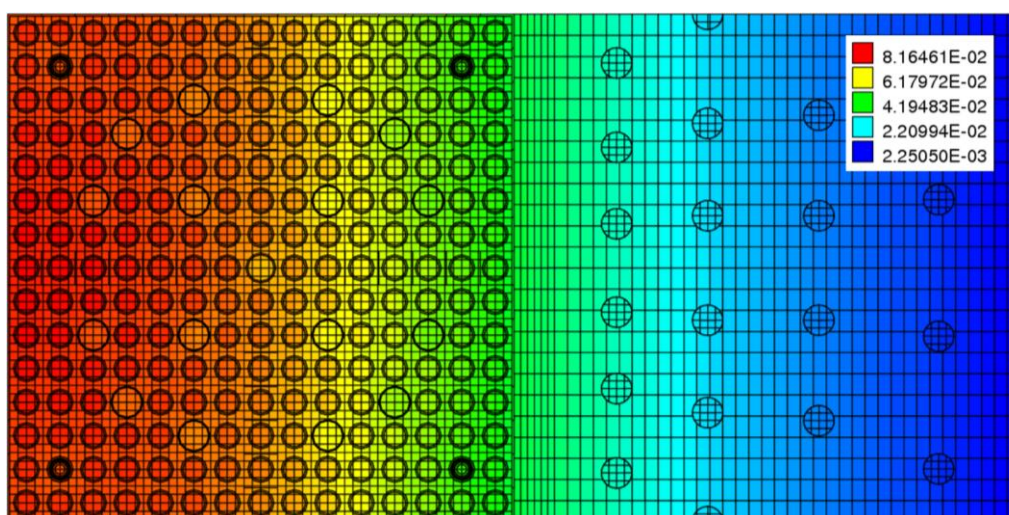


Figura 6.8: mappa di flusso veloce PWR - riflettore pesante

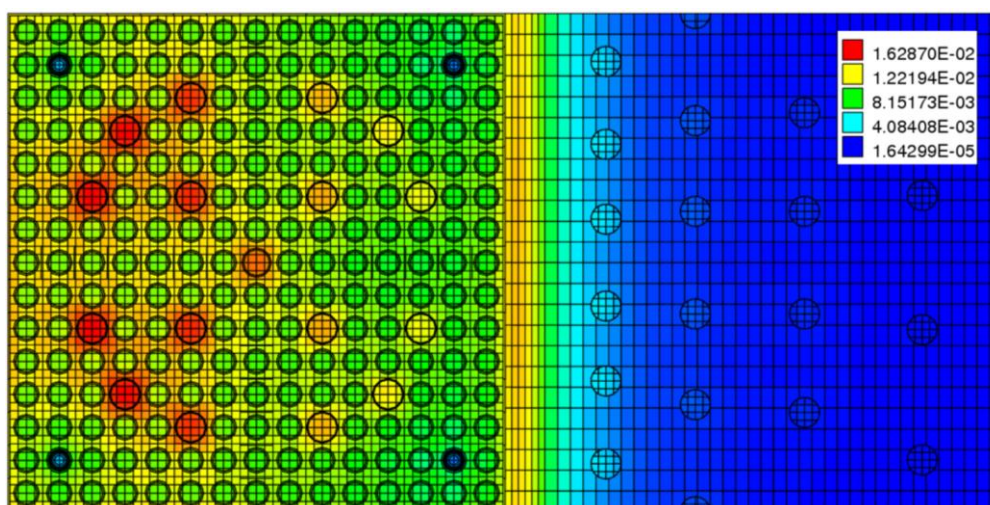


Figura 6.9: mappa di flusso termico PWR - riflettore pesante

L'andamento del profilo di flusso termico e veloce nella mezzeria del sistema viene riportato in Fig. 6.10.

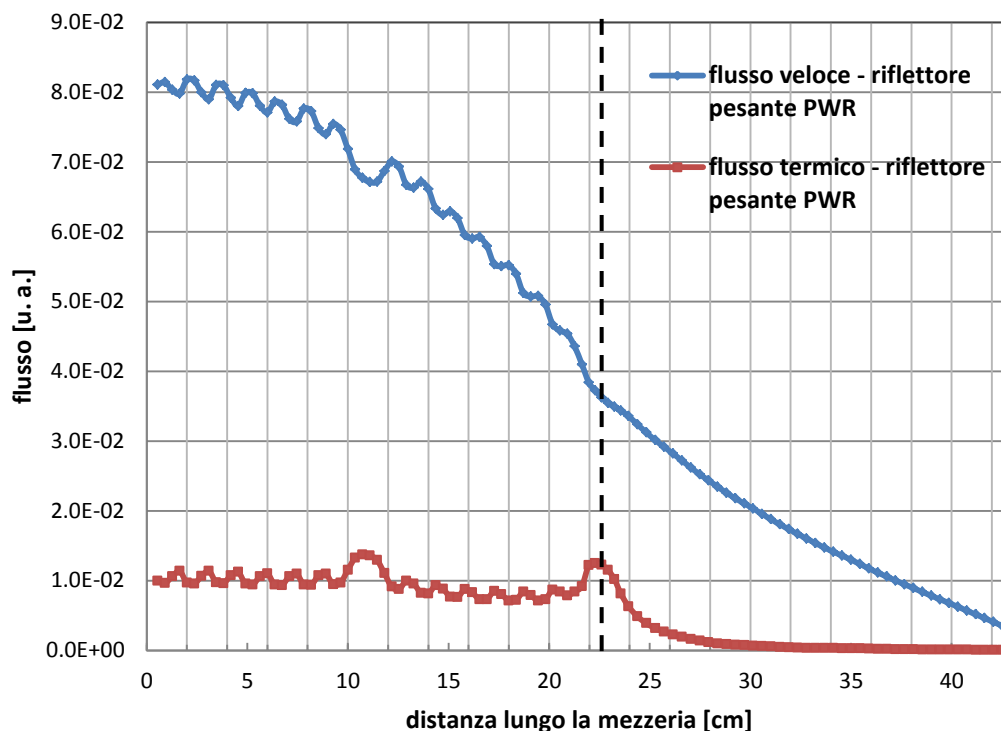


Figura 6.10: profili di flusso termico e veloce PWR – riflettore pesante

Nelle Fig. 6.11 e 6.12 si riporta un diagramma di raffronto tra il flusso termico e veloce per le due configurazioni di riflettore analizzate.

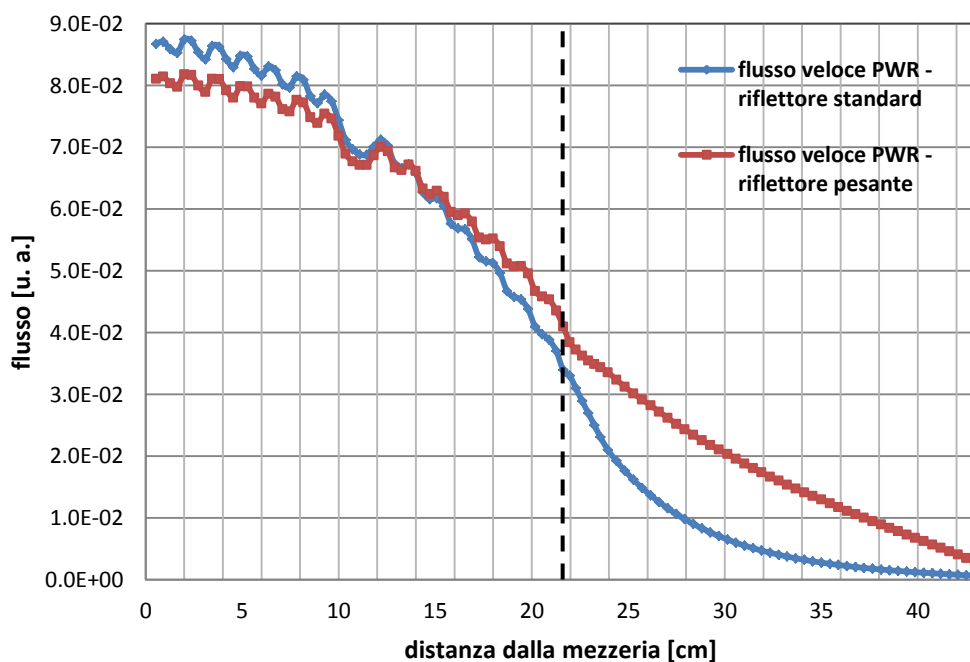
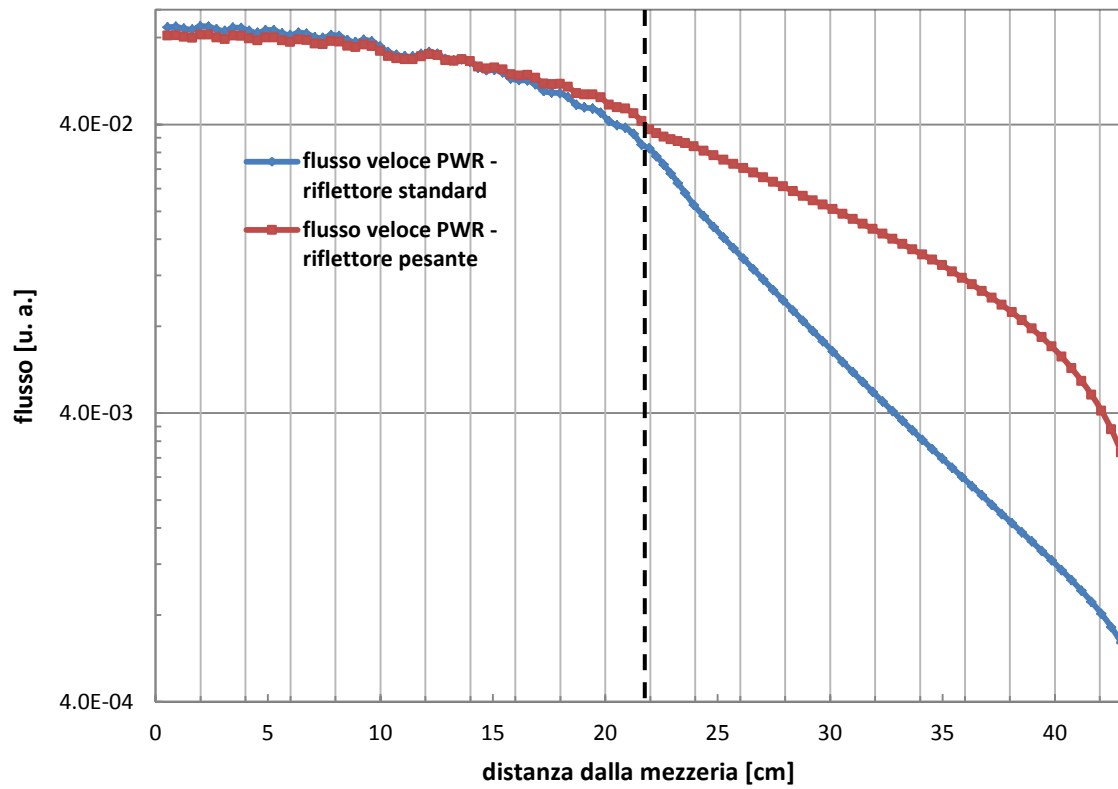
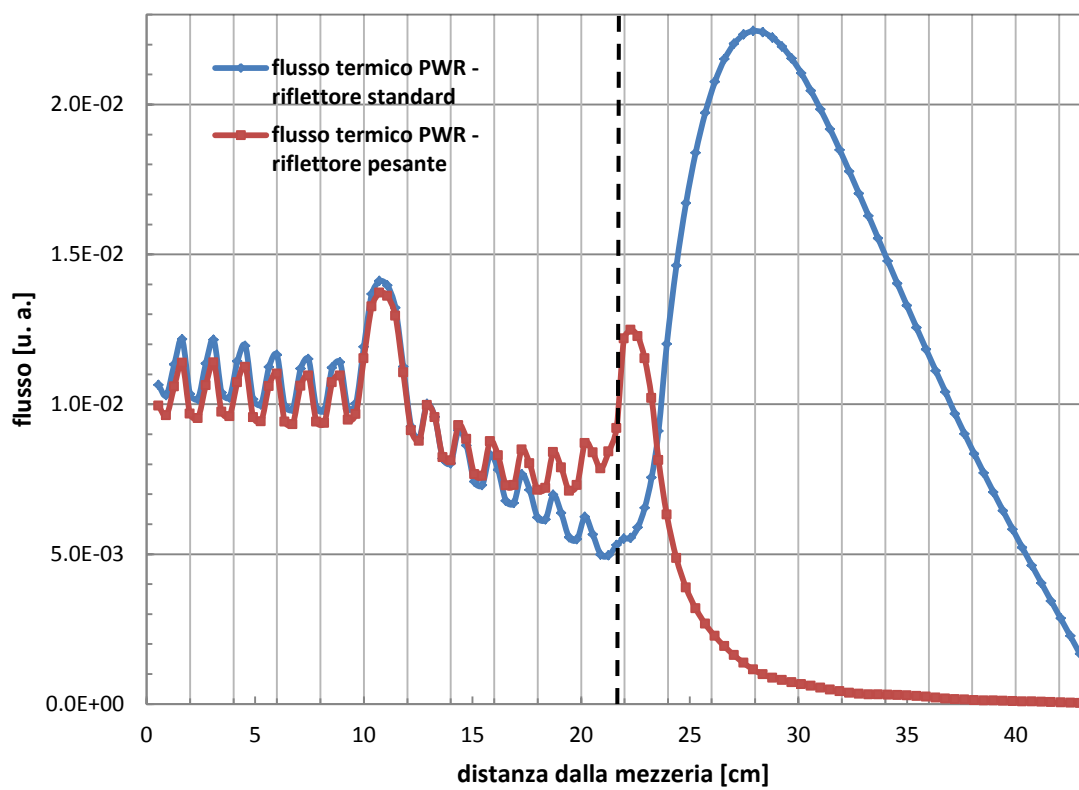


Figura 6.11: profili di flusso veloce di un PWR con riflettore standard e pesante (*lin/lin*)


 Figura 6.12: profili di flusso veloce di un PWR con riflettore standard e pesante (*log/lin*)

 Figura 6.13: profili di flusso termico di un PWR con riflettore standard e pesante (*lin/lin*)

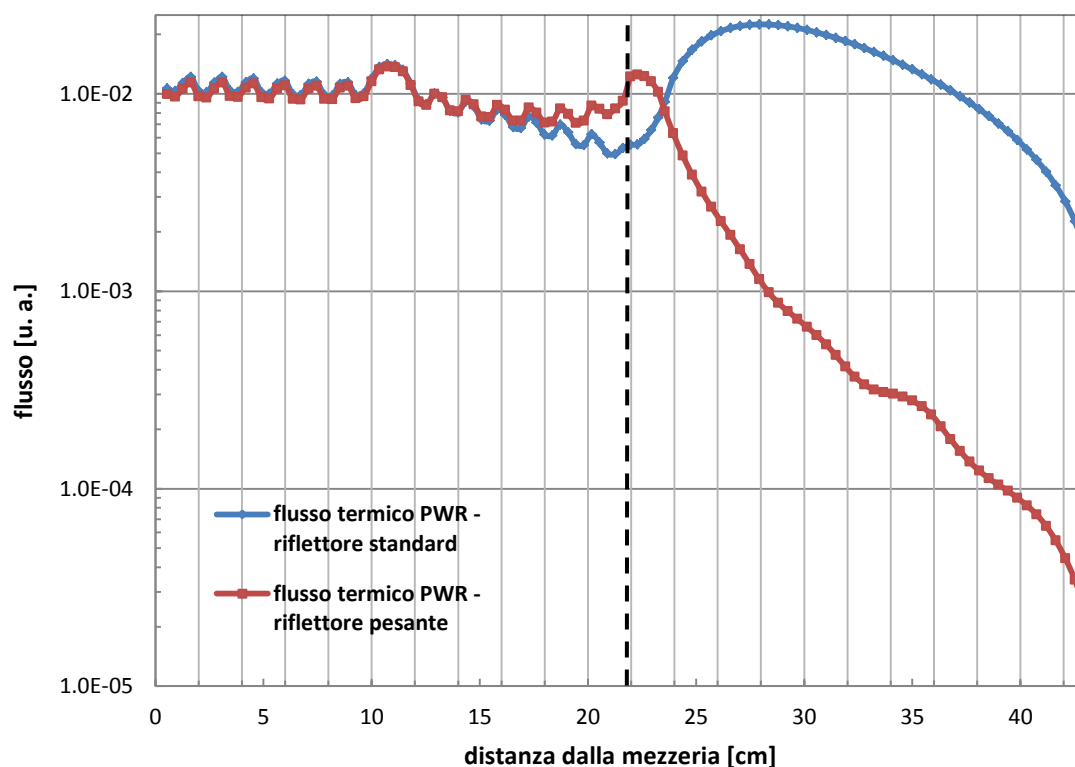


Figura 6.14: confronto dei profili di flusso termico di un PWR con riflettore standard e pesante (*log/lin*)

I dati di cella ottenuti col modulo T-NEWT di SCALE 6.1.3 sono riportati nella Tab. 6.1

Tabella 6.1: dati di cella - riflettore standard e pesante

	Riflettore standard		Riflettore pesante		Var Assembly	Var Riflettore
	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	[%]	[%]
K_{eff}	1.22849		1.26295		3446 pcm	
Σ_{a1}	1.00E-02	1.68E-03	1.01E-02	3.20E-03	0.50	90.48
Σ_{a2}	1.10E-01	1.72E-02	1.11E-01	6.36E-02	0.45	270.31
Σ_{f1}	3.46E-03	0.00E+00	3.47E-03	0.00E+00	0.43	-
Σ_{f2}	7.84E-02	0.00E+00	7.87E-02	0.00E+00	0.37	-
$\Sigma_{1 \rightarrow 2}$	1.66E-02	3.15E-02	1.68E-02	8.64E-03	1.26	-72.62
$\Sigma_{2 \rightarrow 1}$	1.65E-03	3.31E-04	1.63E-03	3.14E-03	-1.39	847.18
Σ_{tot1}	5.56E-01	6.85E-01	5.57E-01	6.05E-01	0.16	-11.68
Σ_{tot2}	1.45E+00	2.06E+00	1.45E+00	1.59E+00	0.14	-22.74
$v\Sigma_{f1}$	8.75E-03	0.00E+00	8.79E-03	0.00E+00	0.42	-
$v\Sigma_{f2}$	1.91E-01	0.00E+00	1.92E-01	0.00E+00	0.37	-
D_1	1.484	1.371	1.481	1.082	-0.20	-21.08
D_2	0.351	0.249	0.351	0.282	0.00	13.25
Σ_{tr1}	2.25E-01	2.43E-01	2.25E-01	3.08E-01	0.13	26.78

Σ_{tr2}	9.49E-01	1.34E+00	9.51E-01	1.18E+00	0.21	-11.65
ϕ_1	6.77E-02	7.56E-03	6.67E-02	1.75E-02	-1.36	132.04
ϕ_2	9.92E-03	1.27E-02	1.01E-02	1.80E-03	1.67	-85.86

La variazione percentuale relativa valutata in Tab. 6.1 è stata valutata scegliendo come riferimento il riflettore standard.

Dall'analisi dei dati della Tab. 6.1 si osserva come, l'utilizzo di un riflettore in acciaio, porti ad un significativo incremento delle sezioni d'urto efficaci di assorbimento e di upscattering dei neutroni termici. Ciò è coerente con le proprietà neutroniche dell'acciaio che, rispetto all'acqua, esibisce sezioni d'urto d'assorbimento termico e di upscattering più elevate le quali, pesate su un flusso neutronico termico ridotto rispetto a quello che si instaura in un riflettore standard, determinano un complessivo aumento delle reaction rate di assorbimento termico e di upscattering.

Tabella 6.2: flussi veloci e termici in un PWR con riflettore standard e pesante

Flussi interfaccia assembly/riflettore	Standard	Pesante
ϕ_1	3.40E-02	4.10E-02
ϕ_2	5.30E-03	9.20E-03
ϕ_2/ϕ_1	0.16	0.22

6.2 Analisi di sensitività

L'analisi del comportamento del riflettore pesante di un sistema EPR - in relazione alla produzione delle sezioni d'urto efficaci omogenee e condensate a due gruppi - è stata preceduta da un'analisi di sensitività su alcuni parametri critici di sistema. I parametri in questione sono suddivisibili in *parametri di codice* (ordine di convergenza dell'autovalore e delle autofunzioni, ordine di approssimazione P_n ed S_m , dimensione delle mesh computazionali, librerie di sezioni d'urto) e *parametri operativi* (condizioni di funzionamento operative, concentrazione di boro, temperatura del riflettore). I paragrafi successivi presentano i risultati ottenuti in termini di stima dell'influenza che ciascun parametro ha nella valutazione delle sezioni d'urto efficaci omogenee e condensate a due gruppi. La geometria di calcolo utilizzata per tutte le analisi di sensitività è stata scelta in modo da imporre per la zona del combustibile le reali dimensioni dell'assembly PWR 17x17, per la zona del riflettore le dimensioni reali del baffle d'acqua presente tra assembly e riflettore e una porzione di riflettore pesante tale da determinare una dimensione totale della zona di riflettore uguale a quella dell'assembly (la scelta di adottare tale dimensionamento è stata dettata dal fatto che i codici di nocciolo consentono una simile rappresentazione del sistema). La rappresentazione geometrica della suddetta modellizzazione viene riportata nella Fig.6.15.

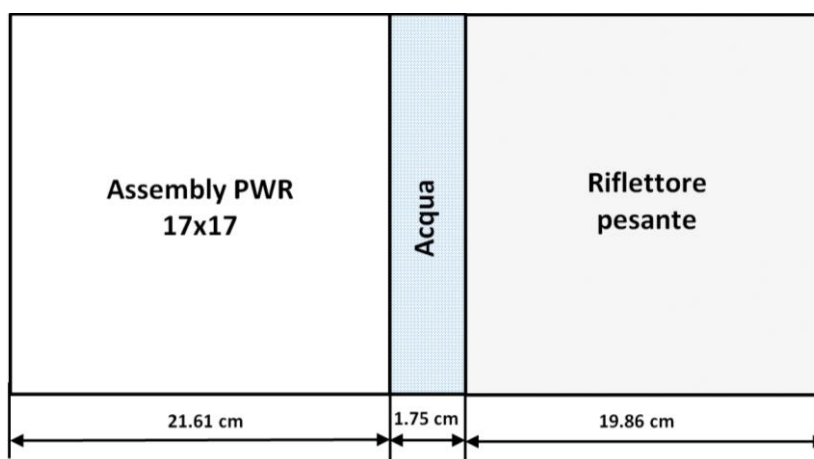


Figura 6.15: geometria sistema assembly/riflettore pesante

6.2.1 Convergenza numerica

Si è realizzata un'analisi preliminare per determinare il valore dei parametri che fissano il soddisfacimento della convergenza sul coefficiente di moltiplicazione effettiva e sul flusso nell'esecuzione del calcolo di trasporto col codice di riferimento (SCALE 6.1.3) che utilizza il metodo delle caratteristiche esposto nel capitolo 2. Si è deciso di fissare il parametro di convergenza del coefficiente di moltiplicazione effettiva in modo tale che la precisione richiesta per la determinazione del k sia superiore ai 10 pcm. Si è quindi indagato il possibile valore da adottare per il coefficiente di convergenza del flusso. Il calcolo è stato realizzato utilizzando la libreria v7-238. Il risultato ottenuto è esposto nella Tab. 6.3.

Tabella 6.3: analisi dei parametri di convergenza numerica

caso	ϵ_{keff}	$\epsilon\phi_{int}$	$\epsilon\phi_{est}$	$It_{est.}$	t	K	ΔK
	[-]	[-]	[-]	[-]	[h]	[-]	[pcm]
1	1.00E-04	1.00E-02	1.00E-02	12	1.97	1.23412	-64
2	1.00E-04	1.00E-03	1.00E-03	29	4.60	1.23470	-6
3	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	45	7.57	1.23475	-1
4	1.00E-05	1.00E-02	1.00E-02	31	4.25	1.23457	-19
5	1.00E-05	1.00E-03	1.00E-03	29	5.17	1.23470	-6
6	1.00E-05	1.00E-04	1.00E-04	47	8.23	1.23476	-

in cui ϵ_{keff} è il criterio di convergenza sul coefficiente di moltiplicazione effettiva, $\epsilon\phi_{int}$ è il criterio di convergenza delle iterazioni interne sul flusso, $\epsilon\phi_{est}$ è il criterio di convergenza delle iterazioni esterne sul flusso, $It_{est.}$ è il numero di iterazioni esterne condotte sino a convergenza, ΔK è la variazione assoluta del coefficiente di moltiplicazione effettiva rispetto al caso 6. Si è deciso di fissare l'incertezza sul coefficiente di moltiplicazione effettivo nell'ordine del pcm. La configurazione ottimale è risultata essere, quindi, il caso 3. I calcoli sono stati comunque realizzati secondo il caso 6 che riportava un aggravio in termini di costi temporali di calcolo di soli 40 minuti.

6.2.2 Ordine di quadratura e di scattering

In riferimento ai parametri di quadratura e di scattering da adottare per la risoluzione approssimata dell'equazione del trasporto da parte del codice di cella, si è realizzata un'analisi di sensitività per testare l'influenza della variazione della coppia di parametri che determinano l'ordine di scattering delle sezioni d'urto (P_n) e l'ordine di quadratura del flusso (S_n) sul valore delle sezioni d'urto efficaci. I risultati ottenuti, valutati in riferimento ad una cella elementare costituita da una sola pin arricchita al 4.85 w/o, sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 6.4: coefficiente di moltiplicazione e flussi al variare dell'ordine di quadratura e di scattering

S_n	P_n	K_{eff}	ΔK_{eff}	ϕ_1	$\Delta\phi_1/\phi_1$	ϕ_2	$\Delta\phi_2/\phi_2$
[-]	[-]	[-]	[-]	[u.a.]	[-]	[u.a.]	[-]
8	1	1.42596	51	1.78E+01	5.71	2.16E+00	1.18
8	3	1.42589	45	1.78E+01	5.79	2.16E+00	0.96
8	5	1.42622	78	1.78E+01	7.41	2.17E+00	3.58
16	1	1.42552	8	1.78E+01	0.00	2.16E+00	0.20
16	3	1.42546	1	1.78E+01	0.00	2.16E+00	-0.02
16	5	1.42545	-	1.78E+01	-	2.16E+00	-

in cui ΔK_{eff} è la variazione assoluta del coefficiente di moltiplicazione effettivo e $\Delta\phi/\phi$ è la variazione percentuale relativa del flusso termico e veloce medi sulla cella; entrambi i parametri sono stati valutati scegliendo come riferimento la configurazione S_{16}/P_5 . I risultati ottenuti mostrano che un'approssimazione di calcolo accettabile possa essere la S_{16}/P_1 . Il manuale del codice di riferimento suggerisce di adottare, per calcoli di reticolo, l'approssimazione S_8/P_1 per il combustibile e gli strutturali ed S_8/P_3 per i materiali altamente moderanti (acqua, grafite). In considerazione del fatto che si dovevano affrontare calcoli anche su elementi non reticolari – il riflettore – si è deciso di mantenere l'approssimazione per l'ordine di quadratura pari a 16 e seguire le indicazioni del codice per la scelta dell'ordine di scattering.

6.2.3 Mesh computazionali

La realizzazione dell'analisi sul riflettore pesante è stata preceduta da un'analisi di sensitività per valutare l'effetto dell'adozione di un diverso magliaggio computazionale nella zona del riflettore sul valore delle sezioni d'urto efficaci. I calcoli sono stati realizzati sia sulla configurazione PWR con riflettore standard che sulla configurazione PWR con riflettore pesante. La scansione della discretizzazione delle mesh computazionali in direzione y ed x utilizzata nell'analisi di sensitività è la seguente: 24X12, 24x24, 36x24, 48x24, 60x24. I risultati ottenuti in termini di coefficiente di moltiplicazione effettivo del sistema sono riportati nella Tab. 6.5.

Tabella 6.5: andamento del k_{eff} al variare delle mesh computazionali

mesh	K_{eff}	Δk	t
[-]	[-]	[-]	[h]
60x24	1.22814	-	23.12
48x24	1.22806	8	22.52
36x24	1.22802	12	16.83
24x24	1.22829	15	16.82
12x24	1.22862	48	16.70

in cui Δk è la variazione assoluta del coefficiente di moltiplicazione effettiva rispetto alla configurazione 60x24 scelta come riferimento. I risultati ottenuti hanno portato a scegliere come configurazione adottabile per i calcolo quella 36x24 che, a fronte di una differenza di soli 12 pcm sul K_{eff} rispetto alla configurazione di riferimento (60x24), permette di realizzare le simulazioni con un risparmio di tempo pari a circa 7 ore (27% in meno). Nei paragrafi successivi, in alcuni casi particolari, è stata comunque adottata, per la zona del riflettore, la configurazione 24x12.

6.2.4 Concentrazione di boro

Nel capitolo 4 si è esaminato che una variazione della concentrazione di boro di 1500 ppm comporti una variazione di meno del 10% sul valore delle sezioni d'urto efficaci di un riflettore standard. Si è allora deciso di analizzare il comportamento del sistema PWR con riflettore pesante per due sole concentrazioni di boro pari a 0 e 1300 ppm. Le condizioni operative utilizzate sono di HZP ($T=570$ K), la densità del moderatore è pari a 0.727 g/cm^3 , l'arricchimento di U235 nell'assembly è pari al 2.1%. Le mesh computazionali utilizzate sono pari a: unità globale 40x12, assembly 17x17, baffle 3x12, riflettore 24x12 celle unitarie 4x4, shroud 6x12 e zona di riflettore 24x12. La distribuzione dei materiali e le mesh computazionali utilizzate nel calcolo sono riportate nelle figure seguenti:

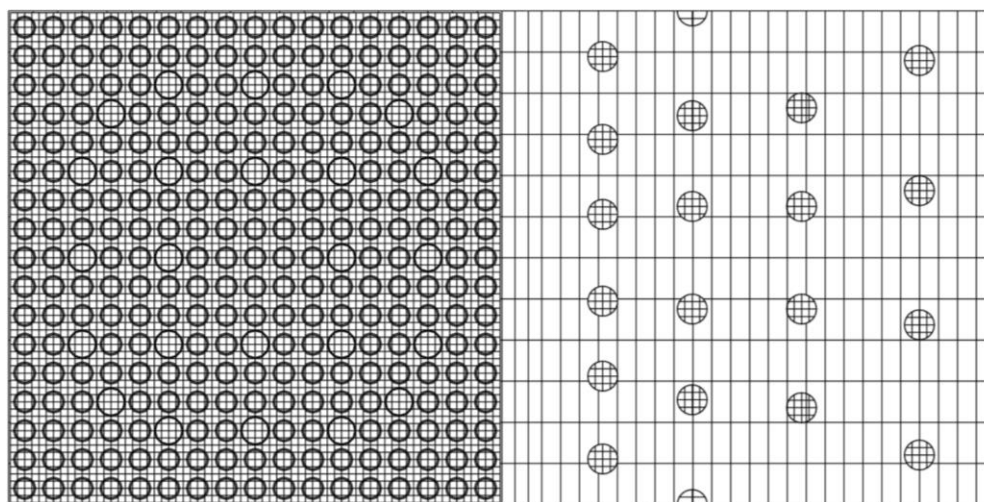


Figura 6.16: mesh computazionali – 0 e 1300 ppm di boro

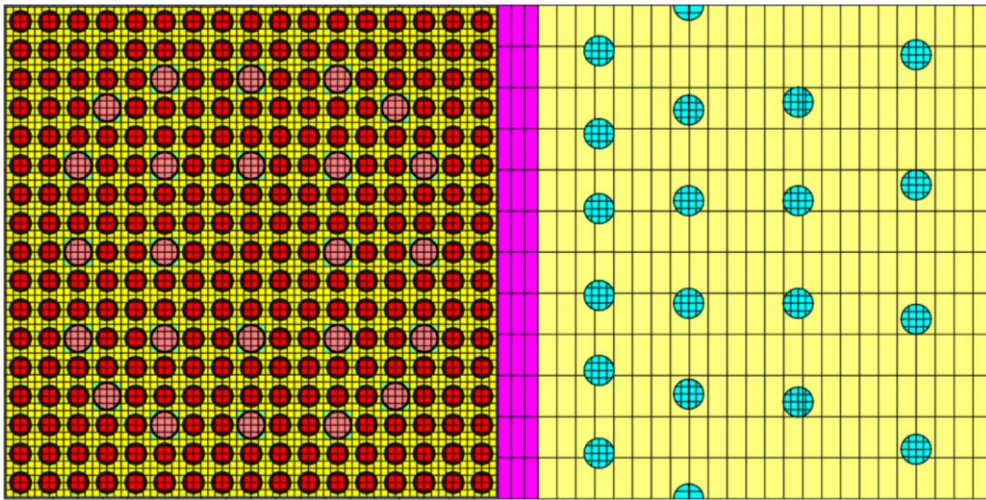


Figura 6.17: distribuzione dei materiali 0 e 1300 ppm di boro

Non essendo stata riscontrata una differenza visivamente apprezzabile tra le mappe di flusso a 0 e 1300 ppm di boro, nelle successive Fig. 6.18-19 si riportano le sole mappe di flusso termico e veloce a 0 ppm di boro.

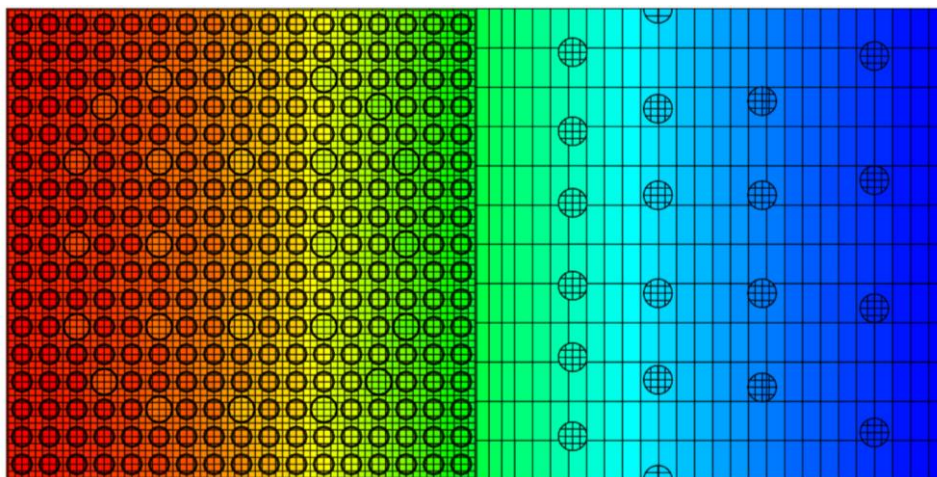


Figura 6.18: mappa di flusso veloce - 0 ppm di boro

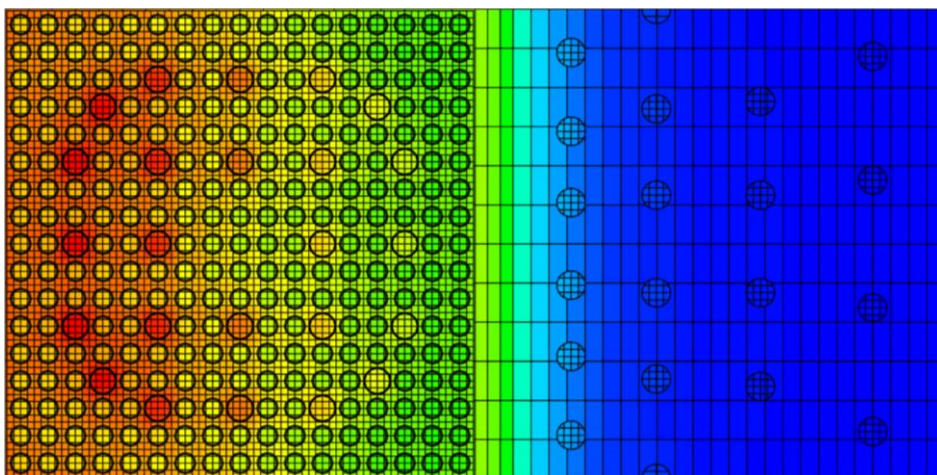


Figura 6.19: mappa di flusso termico – 0 ppm di boro

Nella Tab. 6.6 si riportano i risultati ottenuti in condizioni di HZP ($T=570$ K) per una densità del moderatore pari a 0.727 g/cm^3 ed un arricchimento del combustibile in U325 pari al 2.1%.

Tabella 6.6: Sezioni d'urto efficaci omogenee a 0 e 1300 ppm di boro

	Boro - 0 ppm		Boro - 1300 ppm		var_rel	var_rel
K_{eff}	1.12168		0.94243		[%]	[%]
	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore
Σ_{a1}	8.47E-03	3.21E-03	8.95E-03	3.42E-03	5.63	6.67
Σ_{a2}	6.52E-02	6.20E-02	7.76E-02	7.38E-02	19.01	19.03
Σ_{f1}	2.12E-03	0.00E+00	2.14E-03	0.00E+00	0.66	-
Σ_{f2}	4.24E-02	0.00E+00	4.16E-02	0.00E+00	-2.05	-
Σ_{1-2}	1.77E-02	8.52E-03	1.82E-02	8.74E-03	2.76	2.63
Σ_{2-1}	1.09E-03	2.58E-03	1.27E-03	2.96E-03	16.15	14.97
$\Sigma_{\text{tot}1}$	5.42E-01	5.87E-01	5.48E-01	5.93E-01	1.05	1.04
$\Sigma_{\text{tot}2}$	1.35E+00	1.47E+00	1.34E+00	1.46E+00	-0.15	-0.95
$v\Sigma_{f1}$	5.47E-03	0.00E+00	5.50E-03	0.00E+00	0.53	-
$v\Sigma_{f2}$	1.03E-01	0.00E+00	1.01E-01	0.00E+00	-2.03	-
D_1	1.52	1.08	1.50	1.06	-1.07	-1.21
D_2	0.37	0.31	0.37	0.31	0.21	0.65
$\Sigma_{\text{tr}1}$	2.20E-01	3.10E-01	2.22E-01	3.14E-01	1.05	1.16
$\Sigma_{\text{tr}2}$	8.95E-01	1.08E+00	8.92E-01	1.08E+00	-0.32	-0.55

La variazione relativa percentuale è stata calcolata scegliendo come riferimento la condizione a 0 ppm di boro. Le sezioni d'urto efficaci omogenee che mostrano le variazioni percentuali relative più significative ($>10\%$) sono quelle che risentono maggiormente dell'effetto di un aumento della concentrazione di boro nel sistema (assorbimento termico e downscattering veloce). Il profilo dei flussi termici e veloci per i due casi analizzati viene riportato nella Fig. 6.20.

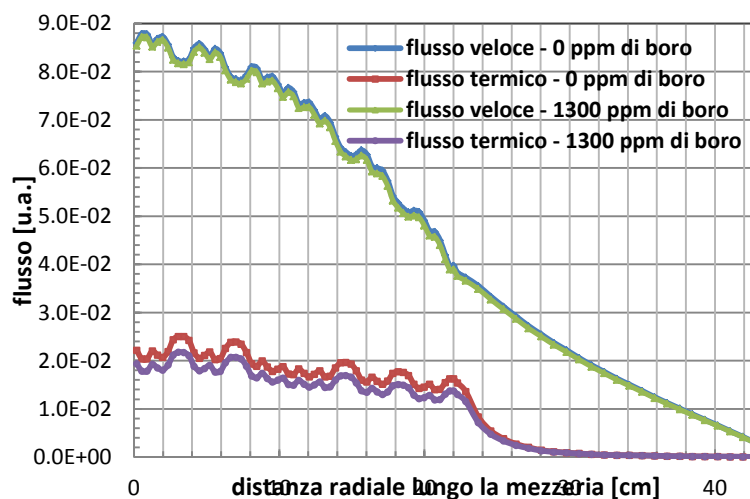


Figura 6.20: profilo di flusso termico e veloce per le configurazioni a 0 e 1300 ppm di boro

La diminuzione del 10% del flusso termico è congruente con la circostanza fisica di aver inserito nel sistema 1300 ppm di boro.

6.2.5 Condizioni operative

L'analisi di sensitività sull'effetto delle condizioni operative sulle sezioni d'urto di riflettore è stata condotta utilizzando i valori di temperatura suggeriti dal benchmark UAM per PWR di generazione GEN III. I valori adottati vengono riportati nella Tab. 6.7.

Tabella 6.7: condizioni operative HZP e HFP

Condizioni operative		
Parametro	HZP	HFP
	[K]	[K]
T_F	570	900
T_C	570	610
T_M	570	584

dove con T_F , T_C e T_M si vogliono indicare, rispettivamente, la temperatura del combustibile, del cladding e del moderatore. La temperatura del riflettore è stata posta pari a quella del moderatore. Il calcolo è stato eseguito con la stessa configurazione citata nel sottoparagrafo 6.2.2 con una concentrazione di boro nulla ed un arricchimento del combustibile pari al 2.25 wt%. Non essendo stata riscontrata una variazione visivamente apprezzabile tra le mappe di flusso ad HZP e ad HFP, nelle Fig. 6.21 e 6.22 viene riportato il risultato realizzato da SCALE 6.1.3 per le sole mappe di flusso termico e veloce in condizione di HFP.

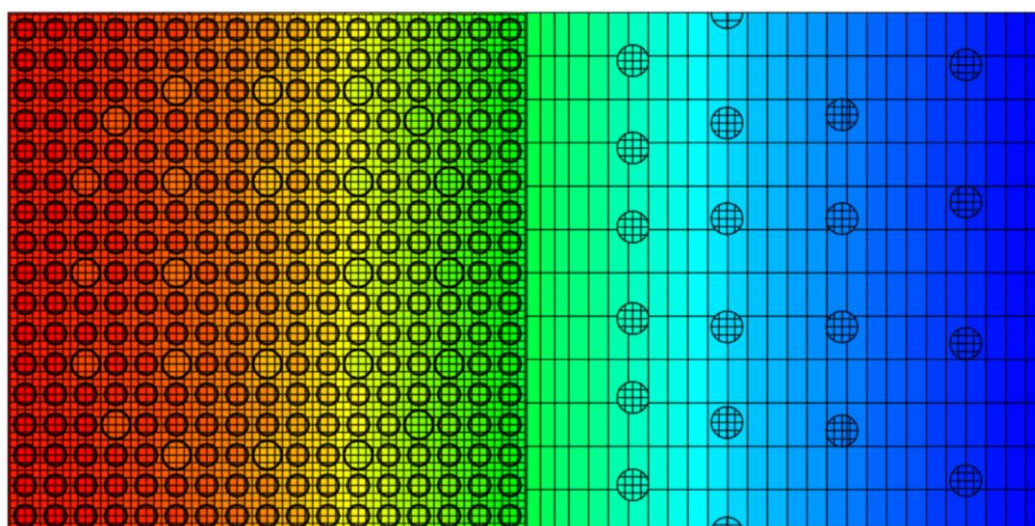


Figura 6.21: mappa di flusso veloce – HFP

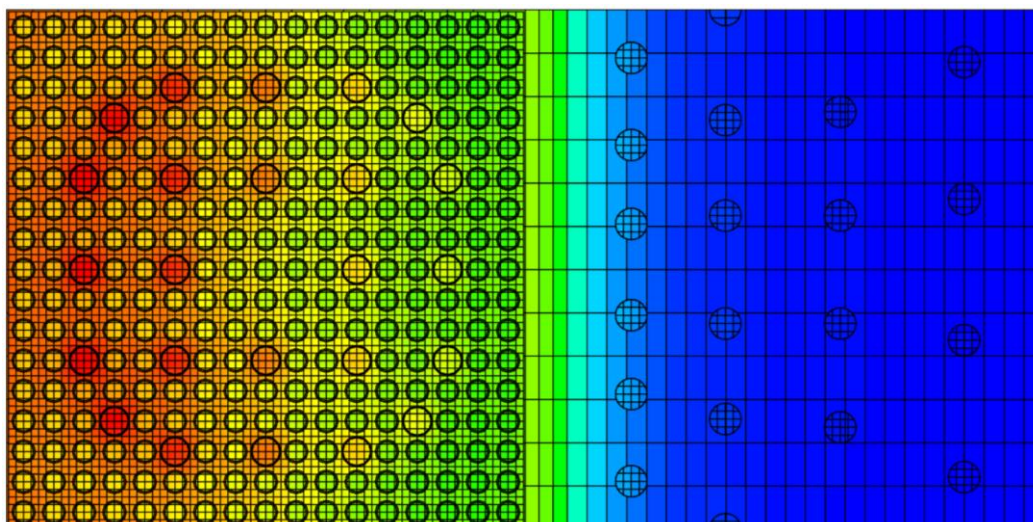


Figura 6.22: mappa di flusso termico – HFP

Nella Fig. 6.23 si riporta il risultato ottenuto in termini di profili di flusso termico e veloce valutati nella mezzeria del sistema per le due configurazioni di HZP e HFP.

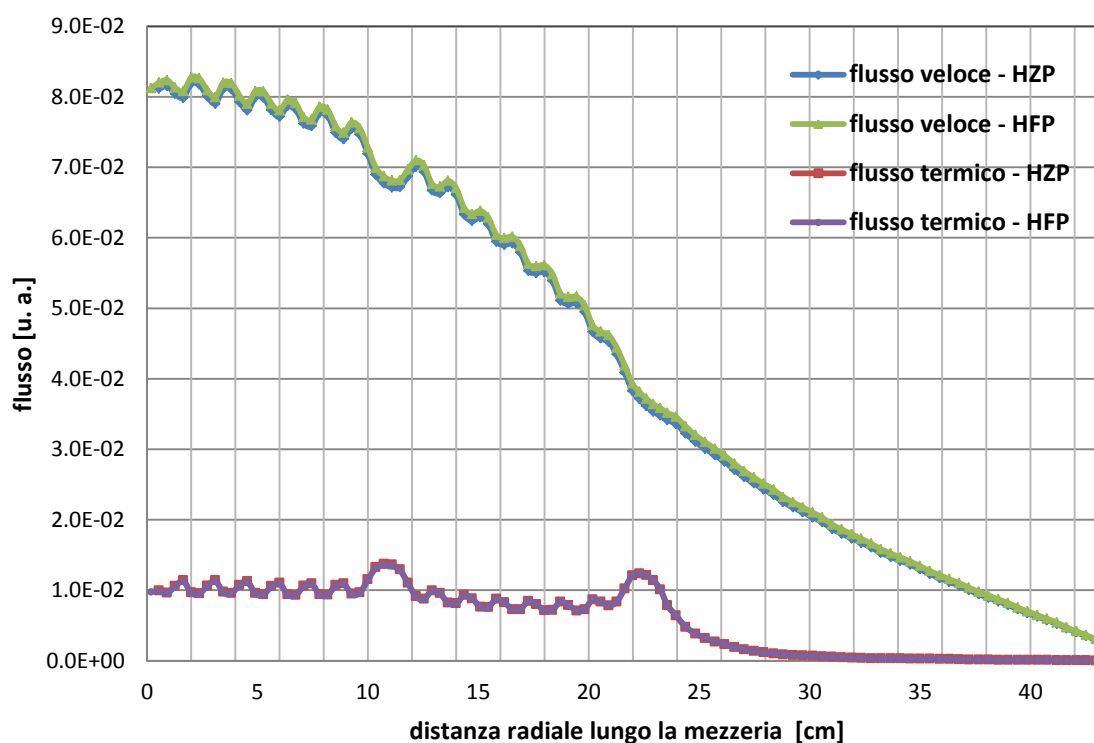


Figura 6.23: profili di flusso termico e veloce - HZP e HFP

la variazione delle condizioni operative comportano una variazione poco significativa del flusso termico e veloce. In particolare, con riferimento alle condizioni di HZP, si verifica un leggero aumento del flusso veloce (tra lo 0.05% e lo 0.3%) ed una lieve diminuzione del

flusso termico (tra lo 0.3% e lo 0.9%). Nella Tab. 7.5 si riportano i risultati ottenuti - in termini di parametri di cella - per le due configurazioni di potenza analizzate.

Tabella 6.8: sezioni d'urto efficaci omogenee - HZP e HFP

	HZP		HFP		var_rel [%]	var_rel [%]
	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore
K_{eff}	1.26295		1.24670		-1626 pcm	
Σ_{a1}	1.01E-02	3.20E-03	1.03E-02	3.19E-03	1.75	-0.23
Σ_{a2}	1.11E-01	6.36E-02	1.09E-01	6.33E-02	-1.14	-0.51
Σ_{f1}	3.47E-03	0.00E+00	3.47E-03	1.81E-02	-0.16	-
Σ_{f2}	7.87E-02	0.00E+00	7.79E-02	1.81E-03	-1.08	-
Σ_{1-2}	1.68E-02	8.64E-03	1.63E-02	8.39E-03	-2.95	-2.85
Σ_{2-1}	1.63E-03	3.14E-03	1.89E-03	3.26E-03	15.86	3.75
Σ_{tot1}	5.57E-01	6.05E-01	5.49E-01	6.01E-01	-1.48	-0.61
Σ_{tot2}	1.45E+00	1.59E+00	1.42E+00	1.56E+00	-2.41	-2.05
$v\Sigma_{f1}$	8.79E-03	0.00E+00	8.77E-03	0.00E+00	-0.18	-
$v\Sigma_{f2}$	1.92E-01	0.00E+00	1.90E-01	0.00E+00	-1.08	-
D_1	1.481	1.082	1.495	1.084	0.91	0.27
D_2	0.351	0.282	0.359	0.286	2.36	1.63
Σ_{tr1}	2.25E-01	3.08E-01	2.23E-01	3.07E-01	-0.90	-0.27
Σ_{tr2}	9.51E-01	1.18E+00	9.29E-01	1.16E+00	-2.30	-1.60
ϕ_1	6.67E-02	1.75E-02	6.77E-02	1.81E-02	1.41	3.21
ϕ_2	1.01E-02	1.80E-03	1.00E-02	1.81E-03	-0.58	0.75

la variazione relativa percentuale è stata valutata scegliendo come configurazione di riferimento quella ad HZP.

6.2.3 Librerie di sezioni d'urto

Si è realizzata un'analisi di sensitività sull'effetto dell'adozione di diverse librerie di sezioni d'urto nel calcolo di trasporto. Il calcolo è stato realizzato utilizzando una configurazione HZP (T=570 K) con concentrazione di boro nulla e arricchimento del combustibile pari al 2.25 wt%. Le librerie di sezioni d'urto testate sono quelle disponibili nella suite di SCALE 6.1.3: v5-238, v6-238, v7-238 e v5-44. Il calcolo con la libreria v5-238, non disponendo quest'ultima di dati di sezioni d'urto per gli isotopi Fe-58 e Cr-52, è stato effettuato con il ferro ed il cromo naturale. Il risultato della simulazione con SCALE 6.1.3 viene riportato nella Tab. 6.9.

Tabella 6.9: sezioni d'urto efficaci omogenee vs librerie di sezioni d'urto

	v5-44		v5-238		v6-238		v7-238	
	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore
K_{eff}	1.11651		1.11543		1.11604		1.12168	
Σ_{a1}	8.51E-03	3.78E-03	8.51E-03	3.74E-03	8.46E-03	3.20E-03	8.47E-03	3.21E-03

Σ_{a2}	6.48E-02	6.16E-02	6.47E-02	6.13E-02	6.51E-02	6.16E-02	6.52E-02	6.20E-02
Σ_{f1}	2.15E-03	0.00E+00	2.14E-03	0.00E+00	2.12E-03	0.00E+00	2.12E-03	0.00E+00
Σ_{f2}	4.21E-02	0.00E+00	4.20E-02	0.00E+00	4.23E-02	0.00E+00	4.24E-02	0.00E+00
Σ_{1-2}	1.74E-02	8.41E-03	1.75E-02	8.51E-03	1.75E-02	8.42E-03	1.77E-02	8.52E-03
Σ_{2-1}	1.18E-03	2.69E-03	1.11E-03	2.66E-03	1.12E-03	2.63E-03	1.09E-03	2.58E-03
Σ_{tot1}	5.38E-01	6.41E-01	5.39E-01	6.38E-01	5.39E-01	5.85E-01	5.42E-01	5.87E-01
Σ_{tot2}	1.36E+00	1.51E+00	1.36E+00	1.51E+00	1.38E+00	1.51E+00	1.34E+00	1.47E+00
$v\Sigma_{f1}$	5.55E-03	0.00E+00	5.51E-03	0.00E+00	5.45E-03	0.00E+00	5.47E-03	0.00E+00
$v\Sigma_{f2}$	1.03E-01	0.00E+00	1.02E-01	0.00E+00	1.03E-01	0.00E+00	1.03E-01	0.00E+00
D_1	1.493	0.94	1.516	0.985	1.528	1.078	1.517	1.075
D_2	0.366	0.299	0.367	0.299	0.36	0.3	0.373	0.308
Σ_{tr1}	2.23E-01	3.55E-01	2.20E-01	3.38E-01	2.18E-01	3.09E-01	2.20E-01	3.10E-01
Σ_{tr2}	9.10E-01	1.12E+00	9.08E-01	1.11E+00	9.26E-01	1.11E+00	8.95E-01	1.08E+00

Le differenze relative percentuali delle librerie di sezioni d'urto testate sono riportate nella Tab. 6.10. Il riferimento scelto è la libreria v7-238 (release 0) che risulta essere la più recente libreria di dati di sezioni d'urto multigruppo disponibile in SCALE 6.1.3.

Tabella 6.10: confronto sezioni d'urto efficaci vs librerie di sezioni d'urto

	v5-44 vs v7-238		v5-238 vs v7-238		v6-238 vs v7-238	
	var_rel	var_rel	var_rel	var_rel	var_rel	var_rel
	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore
K_{eff}	-518 pcm		-625 pcm		-565 pcm	
Σ_{a1}	0.5	17.69	0.42	16.47	-0.2	-0.28
Σ_{a2}	-0.52	-0.55	-0.73	-0.99	-0.16	-0.53
Σ_{f1}	1.3	-	0.71	-	-0.29	-
Σ_{f2}	-0.85	-	-1.07	-	-0.39	-
Σ_{1-2}	-1.61	-1.24	-1.36	-0.06	-1.19	-1.14
Σ_{2-1}	8	4.25	2.31	3.29	3.24	2.13
Σ_{tot1}	-0.73	9.17	-0.55	8.77	-0.61	-0.28
Σ_{tot2}	1.43	2.68	1.31	2.39	2.63	2.26
$v\Sigma_{f1}$	1.39	-	0.84	-	-0.33	-
$v\Sigma_{f2}$	-0.85	-	-1.07	-	-0.39	-
D_1	-1.55	-12.58	-0.07	-8.32	0.77	0.28
D_2	-1.68	-3.05	-1.47	-2.77	-3.41	-2.56
Σ_{tr1}	1.57	14.38	0.07	9.07	-0.76	-0.28
Σ_{tr2}	1.71	3.14	1.49	2.85	3.53	2.62

Le differenze percentuali maggiori si registrano per la libreria v5-44 che è stata ottenuta da un collassamento della libreria ENDF/B-V. Tale circostanza è attribuibile al fatto che il collassamento è stato realizzato con uno spettro neutronico differente rispetto al problema

in esame sulla libreria (v5-238) che presenta differenze percentuali relative notevoli rispetto alla v7-238.

6.2.4 Temperatura del riflettore

In condizioni di funzionamento operative di HFP all'interno del riflettore pesante dei sistemi GEN III+ si instaura un gradiente assiale e radiale di temperatura. La temperatura del riflettore pesante, a causa dell'assorbimento neutronico e gamma da parte dell'acciaio, tende ad assumere valori più elevati rispetto a quella del moderatore. Si è quindi indagato quale sia l'effetto dell'imposizione di una diversa temperatura del riflettore nel calcolo delle sezioni d'urto efficaci del riflettore stesso. Le Fig. 6.24 e 6.25 riportano il risultato ottenuto con FLUENT nella determinazione della distribuzione assiale e radiale di temperatura riferita allo slab più sollecitato.

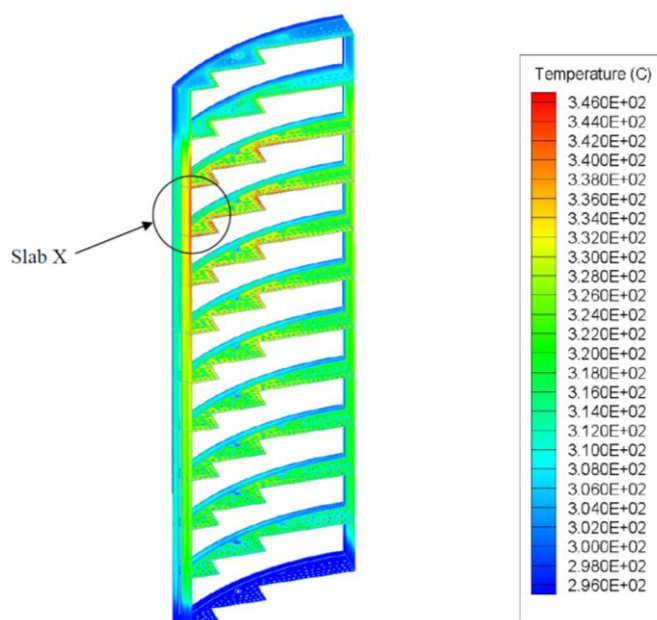


Figura 6.24: distribuzione assiale di temperatura - riflettore pesante

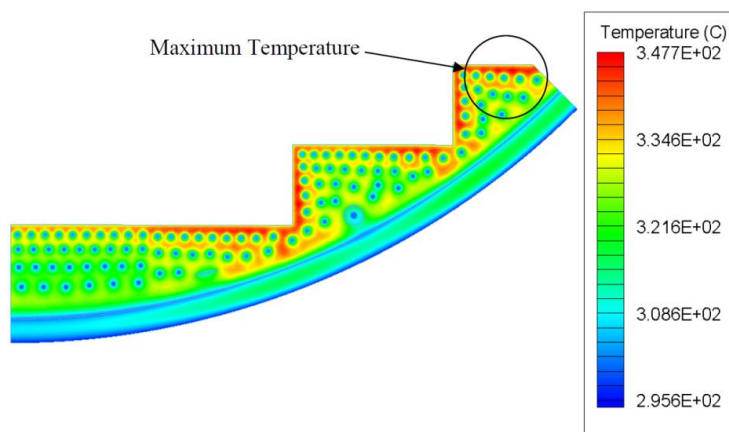


Figura 6.25: distribuzione radiale di temperatura - riflettore pesante

Come si può osservare dalle Fig. 6.24 e 6.25, la temperatura massima viene raggiunta nello slab X ed è pari a circa 350 °C. Si è quindi proceduto a compiere uno studio di sensitività valutando le sezioni d'urto efficaci di riflettore alla temperatura massima di 350 °C, e ad una temperatura pari a quella del moderatore in condizioni di HFP. I valori calcolati con una concentrazione di boro pari a 1300 ppm sono stati confrontati con la configurazione ad HZP (T=550 K).

Tabella 6.11: dati di cella al variare della temperatura del riflettore

	HZP ($T_{rif}=T_{HFP}$)			HFP 1 ($T_{rif}=T_{mod}$)			HFP 2 ($T_{rif}=T_{max}$)		
	Assembly	Zona I	Zona II	Assembly	Zona I	Zona II	Assembly	Zona I	Zona II
K_{eff}	0.94394			0.93552			0.93553		
Σ_{a1}	8.926E-03	3.522E-03	3.080E-03	9.130E-03	3.524E-03	3.086E-03	9.130E-03	3.528E-03	3.086E-03
Σ_{a2}	7.760E-02	7.414E-02	4.511E-02	7.673E-02	7.374E-02	4.474E-02	7.673E-02	7.365E-02	4.474E-02
Σ_{f1}	2.141E-03	0.000E+00	0.000E+00	2.140E-03	0.000E+00	0.000E+00	2.140E-03	0.000E+00	0.000E+00
Σ_{f2}	4.157E-02	0.000E+00	0.000E+00	4.107E-02	0.000E+00	0.000E+00	4.107E-02	0.000E+00	0.000E+00
Σ_{1a2}	1.816E-02	8.002E-03	7.747E-03	1.811E-02	7.998E-03	7.772E-03	1.811E-02	8.010E-03	7.772E-03
Σ_{2a1}	1.262E-03	3.123E-03	1.319E-03	1.456E-03	3.212E-03	1.393E-03	1.456E-03	3.351E-03	1.393E-03
Σ_{tot1}	5.468E-01	6.003E-01	6.045E-01	5.473E-01	6.005E-01	6.047E-01	5.473E-01	6.005E-01	6.047E-01
Σ_{tot2}	1.343E+00	1.448E+00	1.835E+00	1.338E+00	1.444E+00	1.827E+00	1.338E+00	1.444E+00	1.827E+00
$v\Sigma_{f1}$	5.508E-03	0.000E+00	0.000E+00	5.506E-03	0.000E+00	0.000E+00	5.506E-03	0.000E+00	0.000E+00
$v\Sigma_{f2}$	1.013E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.001E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.001E-01	0.000E+00	0.000E+00
D_1	1.506	1.027	0.914	1.506	1.027	0.913	1.506	1.027	0.913
D_2	0.374	0.311	0.278	0.375	0.311	0.280	0.375	0.311	0.280
Σ_{tr1}	2.213E-01	3.244E-01	3.648E-01	2.214E-01	3.246E-01	3.649E-01	2.214E-01	3.246E-01	3.649E-01
Σ_{tr2}	8.920E-01	1.073E+00	1.199E+00	8.879E-01	1.071E+00	1.192E+00	8.879E-01	1.070E+00	1.192E+00
ϕ_1	7.04E-02	2.135E-02	3.096E-03	7.022E-02	2.134E-02	3.095E-03	7.022E-02	2.134E-02	3.095E-03
ϕ_2	1.638E-02	2.148E-03	4.691E-04	1.645E-02	2.160E-03	4.733E-04	1.645E-02	2.161E-03	4.733E-04

La zona I e la zona II rappresentano, ciascuna, la suddivisione geometrica del riflettore in due porzioni ognuna delle quali presenta un passo pari a quello dell'assembly. La variazione percentuale relativa tra la configurazione HFP1 e HFP2 e quella ad HZP viene presentata nella Tab. 6.12.

Tabella 6.12: variazione relativa tra le diverse configurazioni termiche di riflettore EPR

	(HFP1-HZP)/HZP [%]			(HFP2-HZP)/HZP [%]		
	var ass	var Zona I	var Zona II	var ass	var Zona I	var Zona II
K_{eff}	-842			-841		
Σ_{a1}	2.29	0.07	0.22	2.29	0.17	0.22
Σ_{a2}	-1.12	-0.53	-0.83	-1.12	-0.65	-0.83
Σ_{f1}	-0.05	-	-	-0.05	-	-
Σ_{f2}	-1.20	-	-	-1.20	-	-
$\Sigma_{1\rightarrow 2}$	-0.27	-0.05	0.31	-0.27	0.10	0.31
$\Sigma_{2\rightarrow 1}$	15.37	2.85	5.62	15.37	7.32	5.62

Σ_{tot1}	0.10	0.03	0.03	0.10	0.03	0.03
Σ_{tot2}	-0.37	-0.30	-0.43	-0.37	-0.31	-0.43
$v\Sigma_{f1}$	-0.04	-	-	-0.04	-	-
$v\Sigma_{f2}$	-1.20	-	-	-1.20	-	-
D_1	-0.02	-0.04	-0.04	-0.02	-0.04	-0.04
D_2	0.47	0.27	0.55	0.47	0.29	0.55
Σ_{tr1}	0.02	0.04	0.04	0.02	0.04	0.04
Σ_{tr2}	-0.46	-0.27	-0.55	-0.46	-0.29	-0.55
ϕ_1	-0.25	-0.04	-0.02	-0.25	-0.05	-0.02
ϕ_2	0.40	0.54	0.90	0.40	0.61	0.90

I valori trovati mostrano che, eccezion fatta, come logico attendersi, per la sezione d'urto di scattering 2-1, la variazione della temperatura del riflettore di circa 35 o 70 °C rispetto alla condizione HZP risulta essere poco influente (< 1%) sulle sezioni d'urto efficaci.

6.2.5 Configurazione omogenea

Il riflettore pesante EPR è costituito da una distribuzione eterogenea di acciaio e acqua la cui composizione volumetrica omogenea equivalente è pari al 94% di acciaio ed al 6% di acqua con una densità del media pari a 7.90 g/cm³. Si è quindi voluto analizzare l'effetto che una modellizzazione omogenea ha nella valutazione delle sezioni d'urto efficaci. Nelle Fig. 6.26 e 6.27 sono riportate la distribuzione delle mesh computazionali e dei materiali per come realizzati da SCALE 6.1.3.

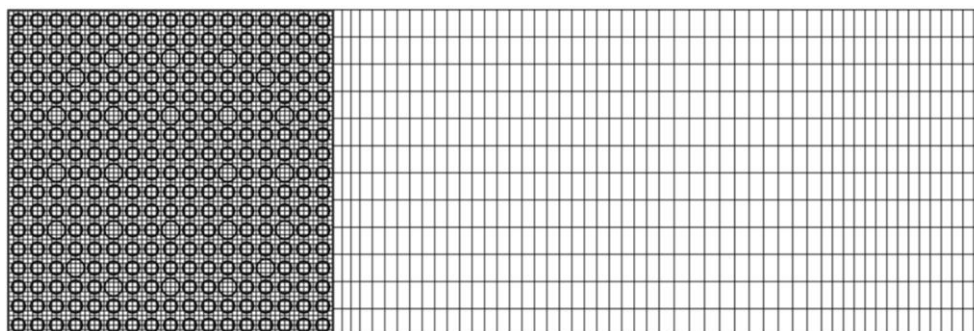


Figura 6.26: mesh computazionali riflettore EPR - configurazione omogenea

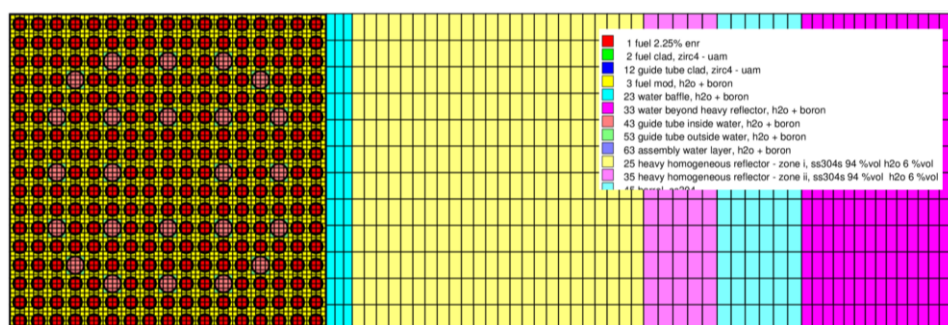


Figura 6.27: distribuzione die materiali riflettore EPR - configurazione omogenea

I risultati delle mappe di flusso termico e veloce sono riportati nelle Fig. 6.28 e 6.29.

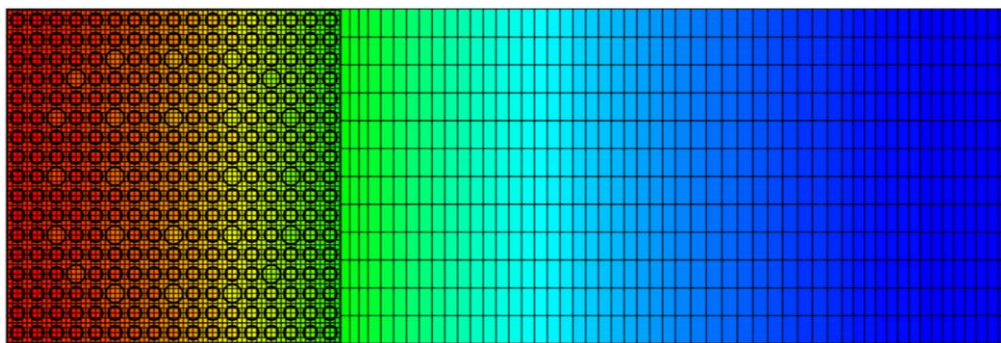


Figura 6.28: mappa di flusso veloce riflettore EPR - configurazione omogenea

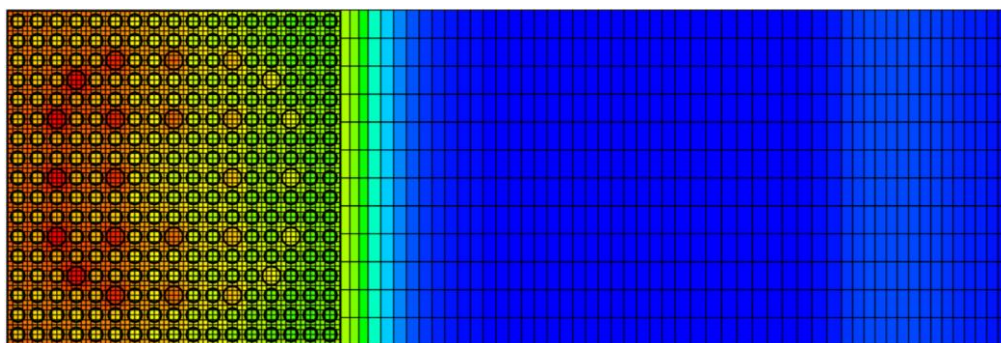


Figura 6.29: mappa di flusso termico riflettore EPR - configurazione omogenea

La variazione delle sezioni d'urto tra configurazione omogenea ed eterogenea è riportata nella Tab. 6.13. La concentrazione di boro utilizzata è pari a 1300 ppm.

Tabella 6.13: dati di cella configurazione hom/hom e configurazione het/hom

	hom/hom [94% vol]		het/hom		Var [%]	Var [%]
	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	assembly	riflettore
K_{eff}	0.94440		0.94243		197 pcm	
Σ_{a1}	8.925E-03	3.850E-03	8.949E-03	3.422E-03	0.27	12.50
Σ_{a2}	7.760E-02	7.533E-02	7.757E-02	7.375E-02	-0.03	2.15
Σ_{f1}	2.141E-03	0.000E+00	2.138E-03	0.000E+00	-0.13	-
Σ_{f2}	4.157E-02	0.000E+00	4.156E-02	0.000E+00	-0.03	-
Σ_{1-2}	1.816E-02	8.143E-03	1.823E-02	8.740E-03	0.41	-6.83
Σ_{2-1}	1.262E-03	3.452E-03	1.266E-03	2.964E-03	0.29	16.47
Σ_{tot1}	5.467E-01	6.389E-01	5.481E-01	5.930E-01	0.24	7.74
Σ_{tot2}	1.343E+00	1.481E+00	1.343E+00	1.459E+00	-0.02	1.53
$v\Sigma_{f1}$	5.508E-03	0.000E+00	5.498E-03	0.000E+00	-0.19	-
$v\Sigma_{f2}$	1.013E-01	0.000E+00	1.013E-01	0.000E+00	-0.03	-
D_1	1.506	0.962	1.501	1.062	-0.35	-9.40
D_2	0.374	0.302	0.374	0.310	0.03	-2.47
Σ_{tr1}	2.213E-01	3.464E-01	2.22E-01	3.14E-01	0.35	10.37
Σ_{tr2}	8.920E-01	1.104E+00	8.92E-01	1.08E+00	-0.03	2.53

in cui la variazione percentuale relativa è stata valutata con riferimento alla configurazione eterogenea.

Si è inoltre indagato il comportamento neutronico del sistema utilizzando percentuali di acciaio e acqua che si discostano dai valori espressi dal sistema reale. Il risultato ottenuto viene riportato in termini di reaction rate di assorbimento e di scattering.

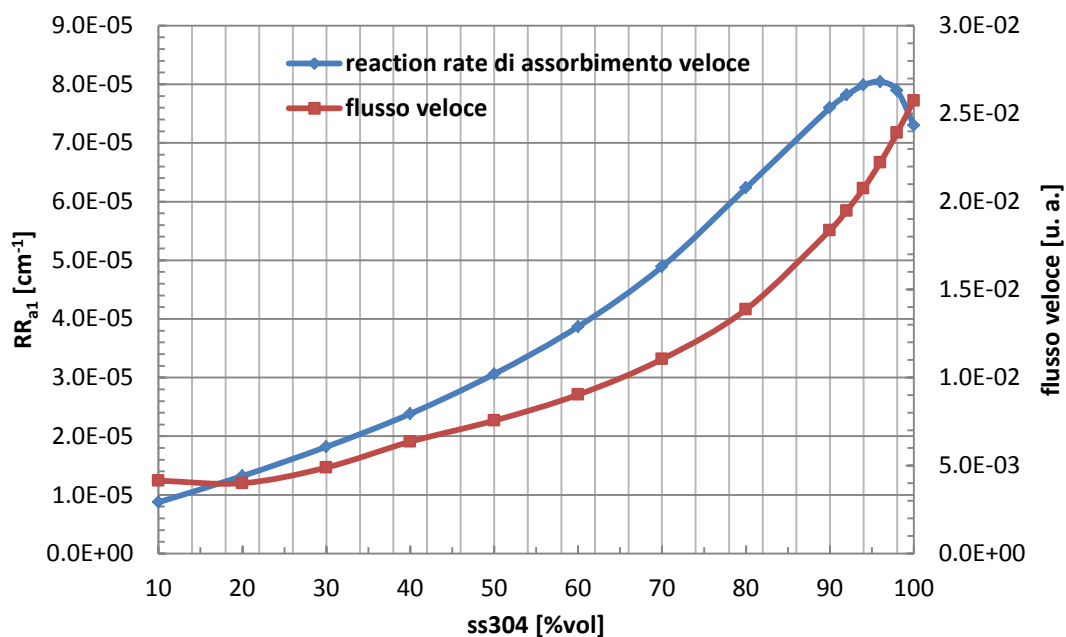


Figura 6.30: reaction rate di assorbimento veloce vs composizione di acciaio

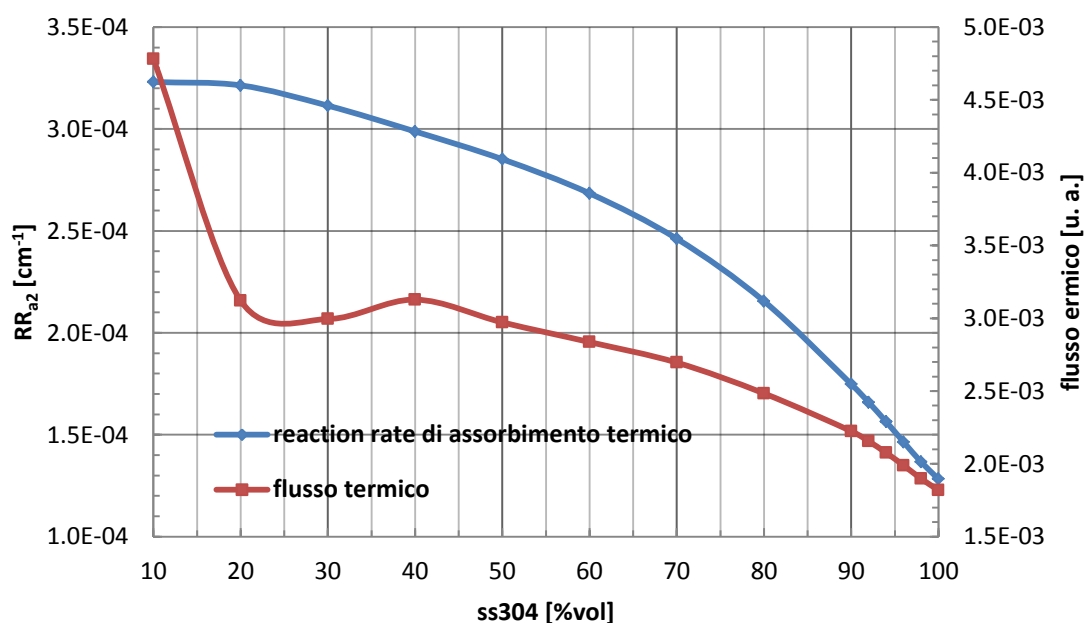


Figura 6.31: reaction rate di assorbimento termico vs composizione di acciaio

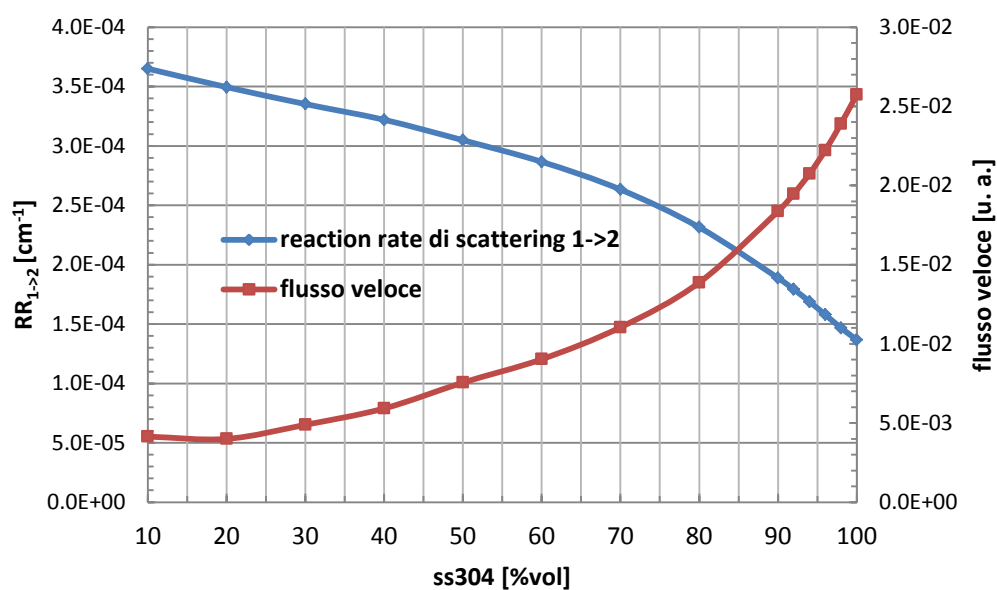


Figura 6.32: reaction rate di scattering 1->2 vs composizione di acciaio

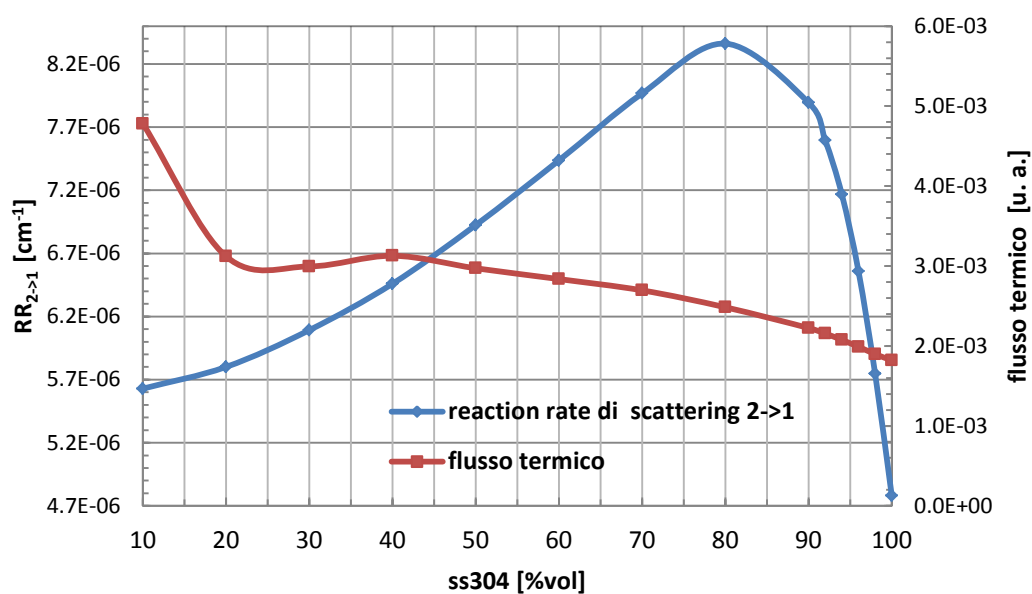


Figura 6.33: reaction rate di scattering 2->1 vs composizione di acciaio

La variazione del fattore di moltiplicazione effettiva del sistema assembly/riflettore pesante viene riportata nella Tab. 7.14. (ricontrollare il flusso termico).

Tabella 6.14: K_{eff} vs percentuale volumetrica di acciaio nel riflettore

V _{ss304}	K _{eff}	ΔK _{eff}
[%]	[pcm]	[pcm]
10	0.91878	-
20	0.91594	-284
30	0.91778	-100

40	0.92046	168
50	0.92281	403
60	0.92565	687
70	0.92928	1050
80	0.93415	1537
90	0.94084	2206
92	0.94248	2371
94	0.94440	2562
96	0.94668	2790
98	0.94944	3066

in cui ΔK_{eff} è la variazione assoluta del coefficiente di moltiplicazione effettivo rispetto alla configurazione al 10% in volume.

I valori delle sezioni d'urto efficaci calcolate col codice di riferimento vengono riportate nella Tab. 6.15 per alcune configurazioni volumetriche analizzate di acciaio nel riflettore.

Tabella 6.15: dati di cella al variare della concentrazione volumetrica di acciaio nel riflettore

	$V_{ss304} [\%]$		$V_{ss304} [\%]$		$V_{ss304} [\%]$		$V_{ss304} [\%]$	
	10		40		80		96	
	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore
K_{eff}	0.91878		0.92046		0.93415		0.94668	
Σ_{a1}	8.820E-03	2.112E-03	8.850E-03	3.748E-03	8.895E-03	4.493E-03	8.932E-03	3.620E-03
Σ_{a2}	7.783E-02	6.757E-02	7.768E-02	9.551E-02	7.761E-02	8.676E-02	7.760E-02	7.360E-02
Σ_{f1}	2.139E-03	0.000E+00	2.141E-03	0.000E+00	2.141E-03	0.000E+00	2.141E-03	0.000E+00
Σ_{f2}	4.171E-02	0.000E+00	4.162E-02	0.000E+00	4.158E-02	0.000E+00	4.157E-02	0.000E+00
Σ_{1-2}	1.777E-02	8.812E-02	1.789E-02	5.041E-02	1.806E-02	1.669E-02	1.818E-02	7.105E-03
Σ_{2-1}	1.232E-03	1.177E-03	1.251E-03	2.065E-03	1.260E-03	3.366E-03	1.262E-03	3.296E-03
$\Sigma_{\text{tot}1}$	5.430E-01	1.475E+00	5.439E-01	1.113E+00	5.455E-01	7.608E-01	5.470E-01	6.177E-01
$\Sigma_{\text{tot}2}$	1.345E+00	4.882E+00	1.344E+00	2.641E+00	1.343E+00	1.587E+00	1.343E+00	1.485E+00
$v\Sigma_{f1}$	5.514E-03	0.000E+00	5.516E-03	0.000E+00	5.513E-03	0.000E+00	5.507E-03	0.000E+00
$v\Sigma_{f2}$	1.016E-01	0.000E+00	1.014E-01	0.000E+00	1.013E-01	0.000E+00	1.013E-01	0.000E+00
D_1	1.520	0.829	1.517	0.836	1.511	0.897	1.505	0.979
D_2	0.373	0.106	0.373	0.180	0.374	0.276	0.374	0.304
$\Sigma_{\text{tr}1}$	2.193E-01	4.020E-01	2.197E-01	3.986E-01	2.206E-01	3.717E-01	2.215E-01	3.404E-01
$\Sigma_{\text{tr}2}$	8.939E-01	3.148E+00	8.927E-01	1.853E+00	8.921E-01	1.206E+00	8.920E-01	1.097E+00
ϕ_1	6.833E-02	4.142E-03	6.904E-02	6.359E-03	6.989E-02	1.387E-02	7.052E-02	2.222E-02
ϕ_2	1.593E-02	4.781E-03	1.598E-02	3.128E-03	1.620E-02	2.484E-03	1.642E-02	1.990E-03

6.3 Configurazione a più assembly

Il calcolo delle sezioni d'urto di riflettore è stato sempre realizzato accoppiando alla zona di riflettore un assembly di combustibile che svolge una duplice funzione: fornisce il termine

sorgente del flusso neutronico per la risoluzione diretta dell'equazione del trasporto neutronico e permettere una modellizzazione realistica del sistema di riflessione attraverso l'accoppiamento dell'assembly più periferico del nocciolo con il riflettore. Si è però voluto indagare quale sia l'effetto dell'aggiunta di uno o più assembly - che precedono quello più periferico lungo la mezzeria del nocciolo – sulle sezioni d'urto efficaci di riflettore.

Il calcolo è stato realizzato utilizzando una configurazione dimensionale di riflettore omogeneizzato a zone secondo quanto previsto da R. Sanchez et al. Tale configurazione prevede una discretizzazione omogenea del riflettore secondo una scansione geometrica che prevede due zone di acciaio al 100% vol, una zona al 79% vol ed una zona al 94% vol. Le dimensioni lineari associate alle diverse zone sono mostrate nella Fig.6.34. La configurazione proposta non prevede l'inserimento del baffle d'acqua tra il nocciolo ed il riflettore.

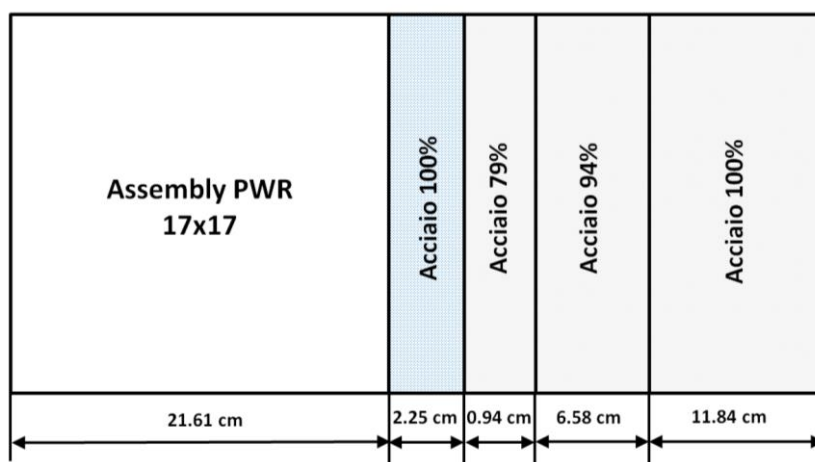


Figura 6.34: dimensioni radiali riflettore EPR omogeneizzato a zone – 1A+1R

Le condizioni operative utilizzate per il calcolo sono di HFP con un arricchimento del combustibile pari al 2.25% con un moderatore privo di boro. Le mesh computazionali e la distribuzione dei materiali sono riportate nelle Fig. 6.35 e 6.36.

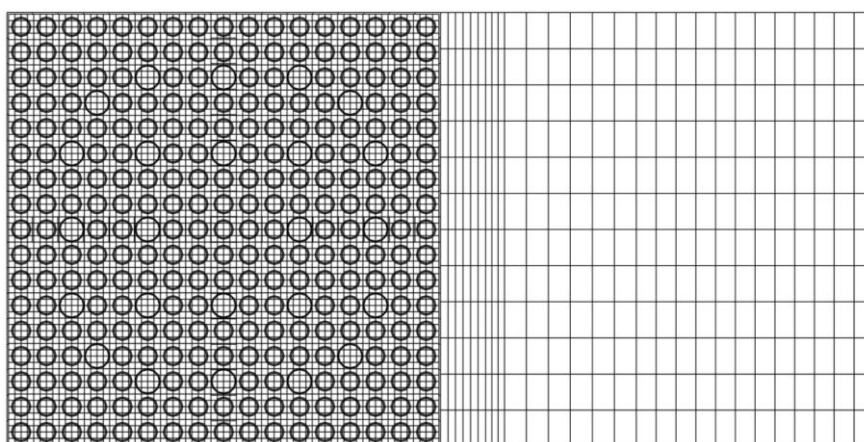


Figura 6.35: mesh computazionali riflettore EPR omogeneizzato a zone – 1A+1R

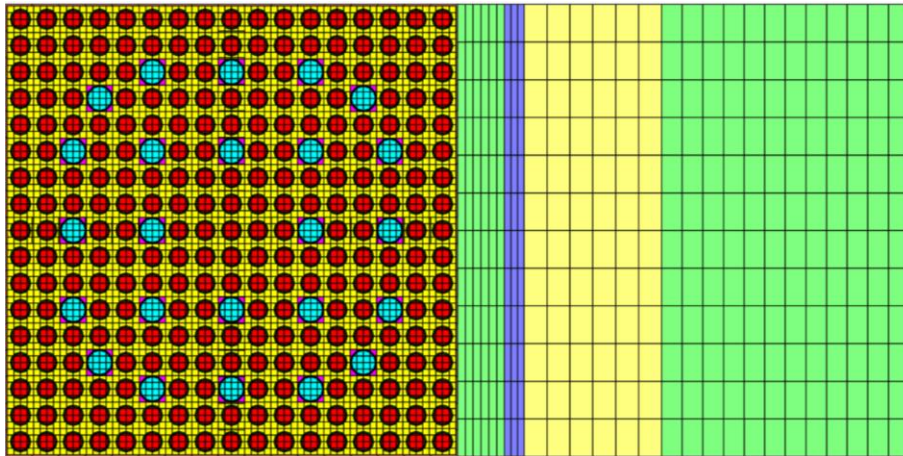


Figura 6.36: distribuzione dei materiali riflettore EPR omogeneizzato a zone – 1A+1R

Le mappe di flusso veloce e termico realizzate dal codice di riferimento (SCALE 6.1.3) vengono riportate nelle figure seguenti:

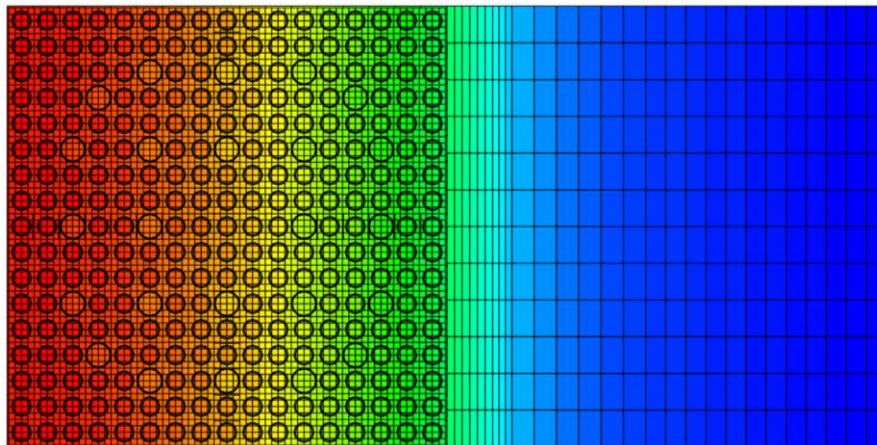


Figura 6.37: mappa di flusso veloce riflettore EPR omogeneizzato a zone -1A+1R

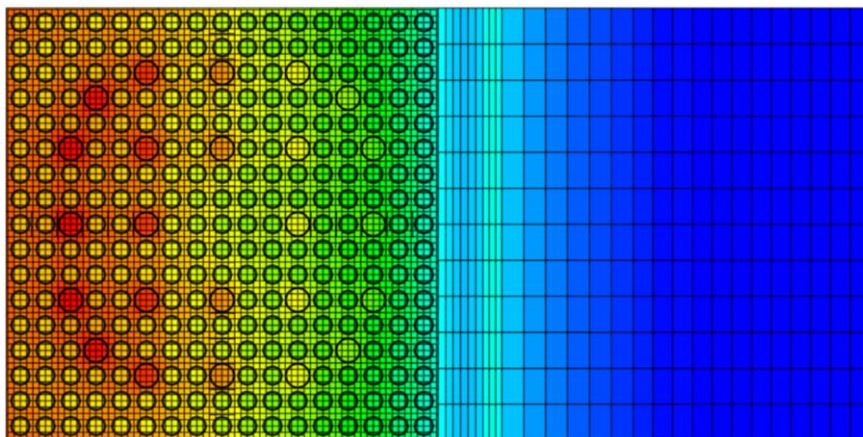


Figura 6.38: mappa di flusso termico riflettore EPR omogeneizzato a zone -1A+1R

E' stata realizzata una seconda cofigurazione, del tutto identica alla precedente, in cui però il riflettore è stato accoppiato a due assembly PWR 17x17 di tipo A1 (arricchimento a 2.25 w/o

senza pin gadolinate) e C1 (arricchimento al 3.25 w/o con 8 barre di combustibile gadolinato al 6% e 4 barre di combustibile gadolinato al 2%) . La rappresentazione geometrica di tale configurazione viene presentata nella Fig. 6.39.

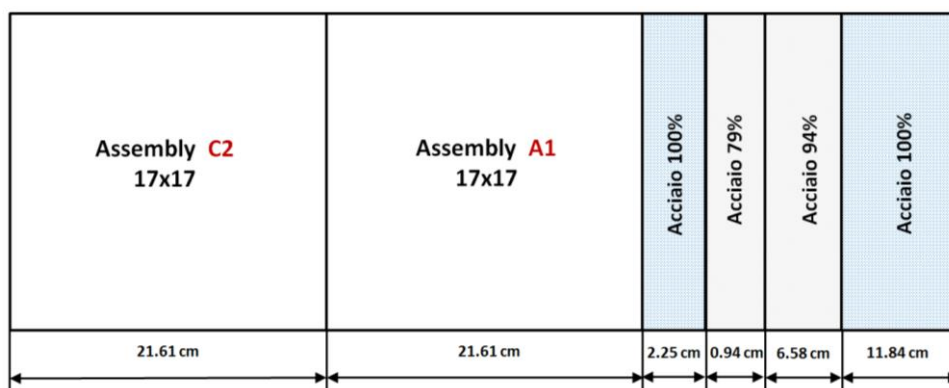


Figura 6.39: dimensioni radiali riflettore pesante omogeneizzato a zone - 2A+1R

La distribuzione delle mesh computazionali e dei materiali viene riportata nelle Fig. 6.40 e 6.41.

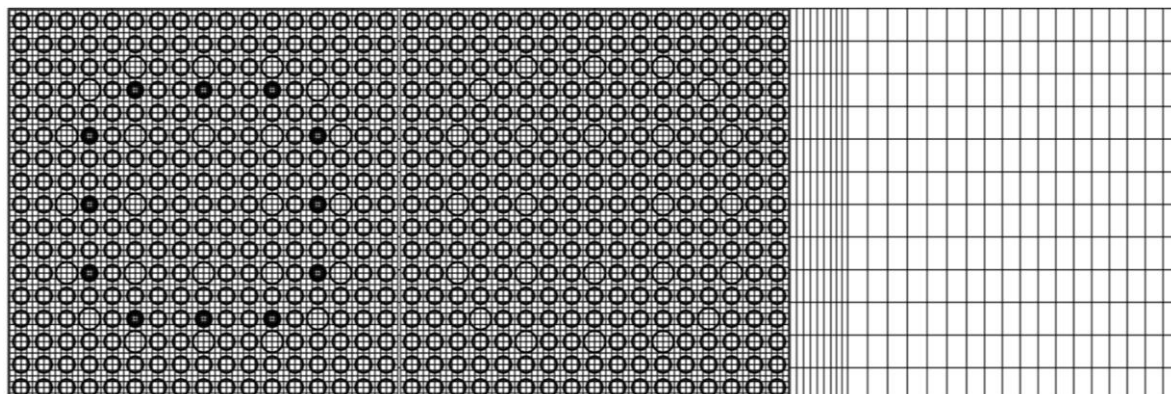


Figura 6.40: distribuzione mesh computazionali riflettore EPR omogeneizzato a zone - 2A+1R

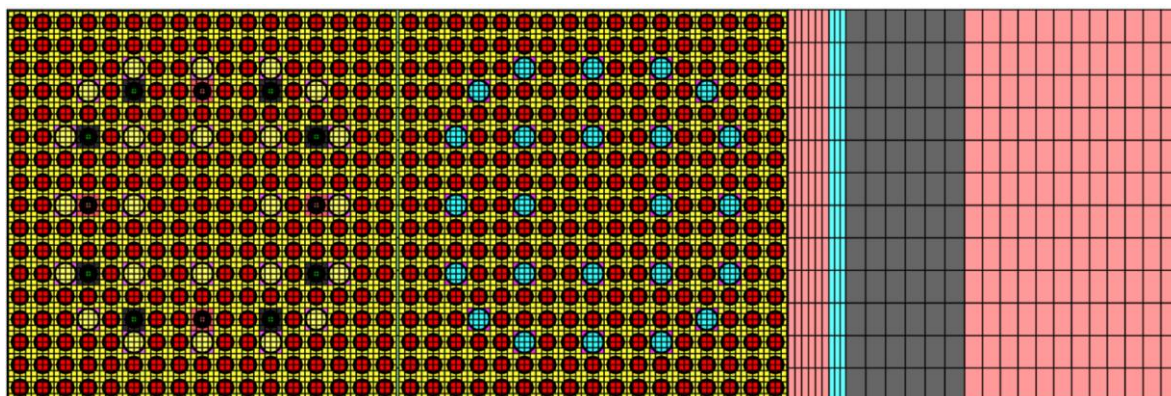


Figura 6.41: distribuzione dei materiali riflettore EPR omogeneizzato a zone - 2A+1R

Le mappe di flusso veloce e termico, ottenute con SCALE 6.1.3, vengono riportate nelle Fig. 6.42 e 6.43.

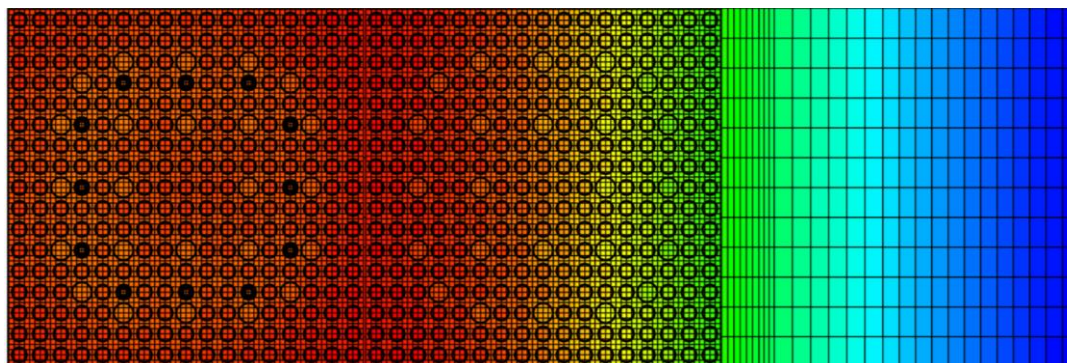


Figura 6.42: mappa di flusso veloce riflettore EPR omogeneo a zone - 2A+1R

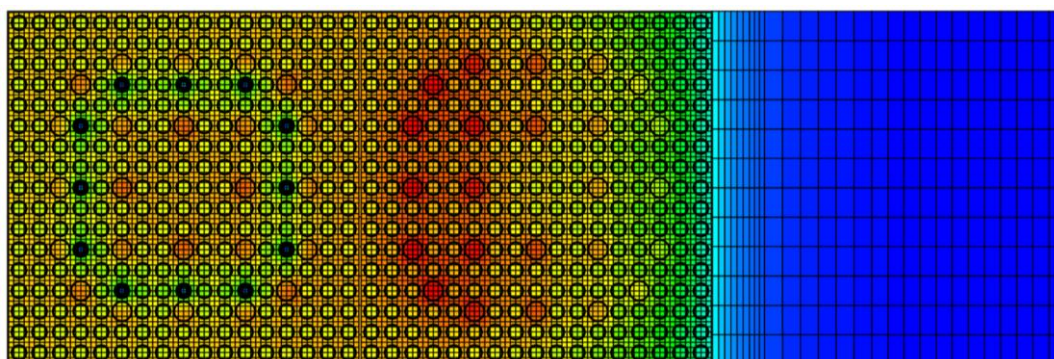


Figura 6.43: mappa di flusso veloce riflettore EPR omogeneo a zone - 2A+1R

Il risultato del calcolo delle costanti di cella in assenza di boro nel moderatore ed in condizioni di HFP sono riportati nella Tab. 6.16.

Tabella 6.16: dati di cella riflettore pesante omogeneo - 1A+2R

	1A+1R		2A+1R		var_Ass	Var_Rif
	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	[%]	[%]
K_{eff}	1.07013		1.08209		1196 pcm	
Σ_{a1}	8.75E-03	4.84E-03	9.30E-03	3.56E-03	6.29	-26.41
Σ_{a2}	6.46E-02	1.27E-01	6.76E-02	1.11E-01	4.58	-12.87
Σ_{f1}	2.15E-03	0.00E+00	2.27E-03	0.00E+00	5.69	-
Σ_{f2}	4.22E-02	0.00E+00	4.45E-02	0.00E+00	5.35	-
Σ_{1-2}	1.66E-02	2.04E-02	1.62E-02	1.71E-03	-2.66	-91.60
Σ_{2-1}	1.33E-03	3.92E-03	1.42E-03	6.37E-03	7.17	62.69
Σ_{tot1}	5.28E-01	8.71E-01	5.27E-01	5.76E-01	-0.28	-33.81
Σ_{tot2}	1.28E+00	2.10E+00	1.25E+00	1.05E+00	-2.29	-49.89
$v\Sigma_{f1}$	5.53E-03	0.00E+00	5.83E-03	0.00E+00	5.58	-
$v\Sigma_{f2}$	1.03E-01	0.00E+00	1.08E-01	0.00E+00	5.35	-
D_1	1.53	0.79	1.50	0.96	-1.87	22.14

D_2	0.39	0.21	0.40	0.33	1.89	60.76
Σ_{tr1}	2.18E-01	4.22E-01	2.22E-01	3.46E-01	1.91	-18.12
Σ_{tr2}	8.54E-01	1.62E+00	8.39E-01	1.01E+00	-1.85	-37.79
φ_1	7.45E-02	9.94E-03	4.05E-02	1.19E-02	-45.56	19.38
φ_2	1.80E-02	1.87E-03	9.08E-03	4.20E-04	-49.40	-77.48

La Tab. 6.16 riporta anche il confronto - in termini di percentuale relativa rispetto alla configurazione ad un assembly - della configurazione ad un assembly con quella a due assembly.

I risultati ottenuti hanno suggerito la necessità di effettuare ulteriori indagini considerando tutti gli 8.5 assembly esistenti tra il centro del nocciolo EPR ed il riflettore pesante in condizioni di BOC. La concentrazione di boro è stata posta pari a 1300 ppm e le condizioni operative sono stati poste pari a quelle di HFP. La Fig. 6.44 mostra la disposizione degli assembly nel nocciolo EPR in condizioni di BOC.

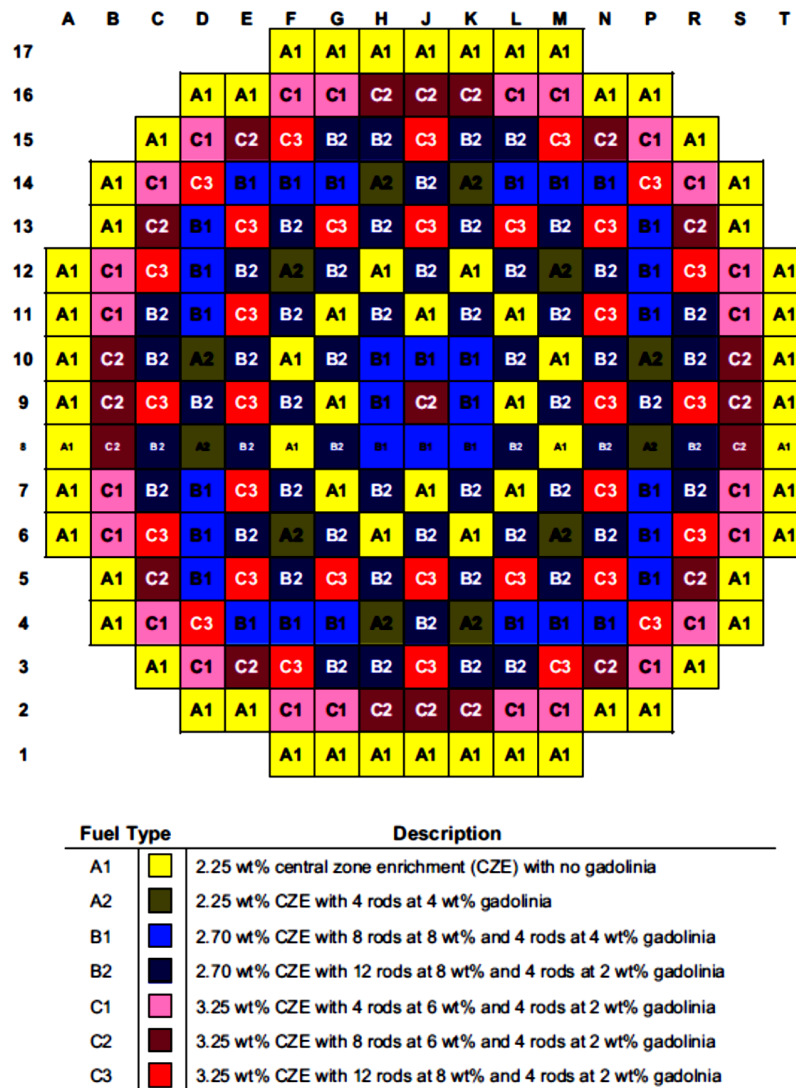


Figura 6.44: nocciolo EPR con disposizione degli assembly in condizioni di BOC.

Il calcolo, per problematiche inerenti il raggiungimento della convergenza, è stato effettuato con una convergenza sul flusso pari a 10^{-3} ed una convergenza sul K_{eff} pari a 10^{-4} . La Fig.6.45 rappresenta la disposizione geometrica della configurazione ad 8.5 assembly.

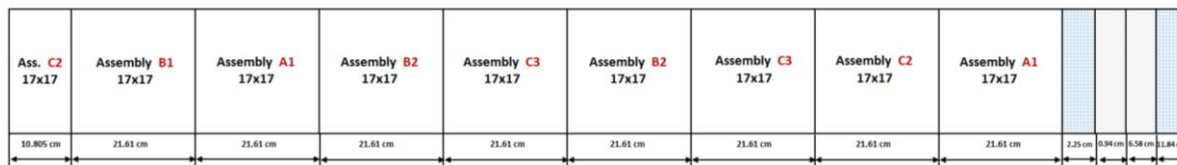


Figura 6.45: dimensioni radiali riflettore pesante omogeneizzato a zone - 8.5A+1R

Le mesh computazionali e la distribuzione dei materiali utilizzati in SCALE 6.1.3 sono riportati in Fig. 6.46 e Fig. 6.47.

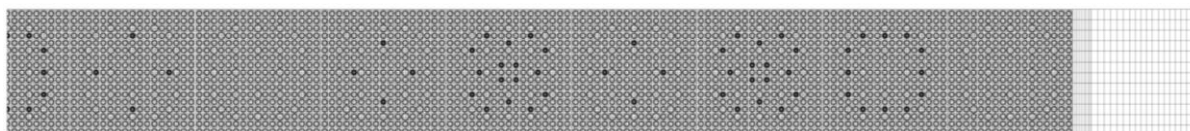


Figura 6.46: mesh computazionali riflettore pesante omogeneo - 8.5A+1R

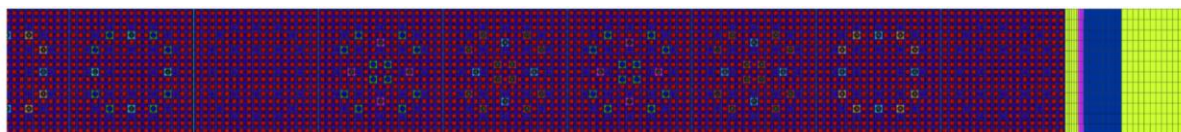


Figura 6.47: distribuzione dei materiali riflettore pesante omogeneo - 8.5A+1R

Le mappe di flusso termico e veloce ottenute col codice di riferimento sono riportate nelle Fig. 6.48 e 6.49.

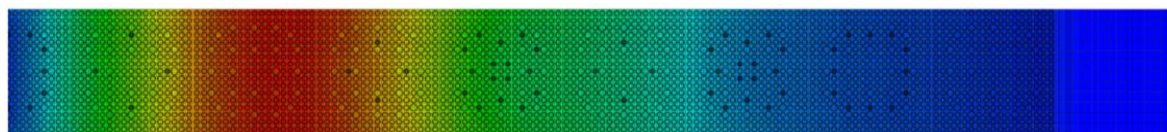


Figura 6.48: mappa di flusso veloce riflettore pesante omogeneo - 8.5A+1R

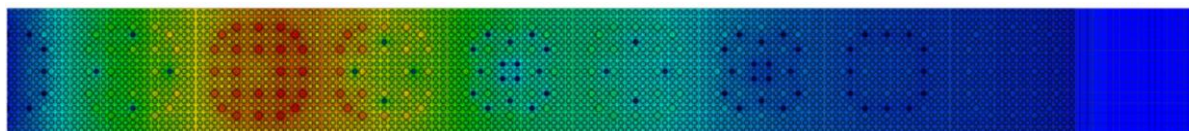


Figura 6.49: mappa di flusso termico riflettore pesante omogeneo - 8.5A+1R

La distribuzione dei profili di flusso termico e veloce nella zona di mezzeria del sistema viene riportato in Fig. 6.50.

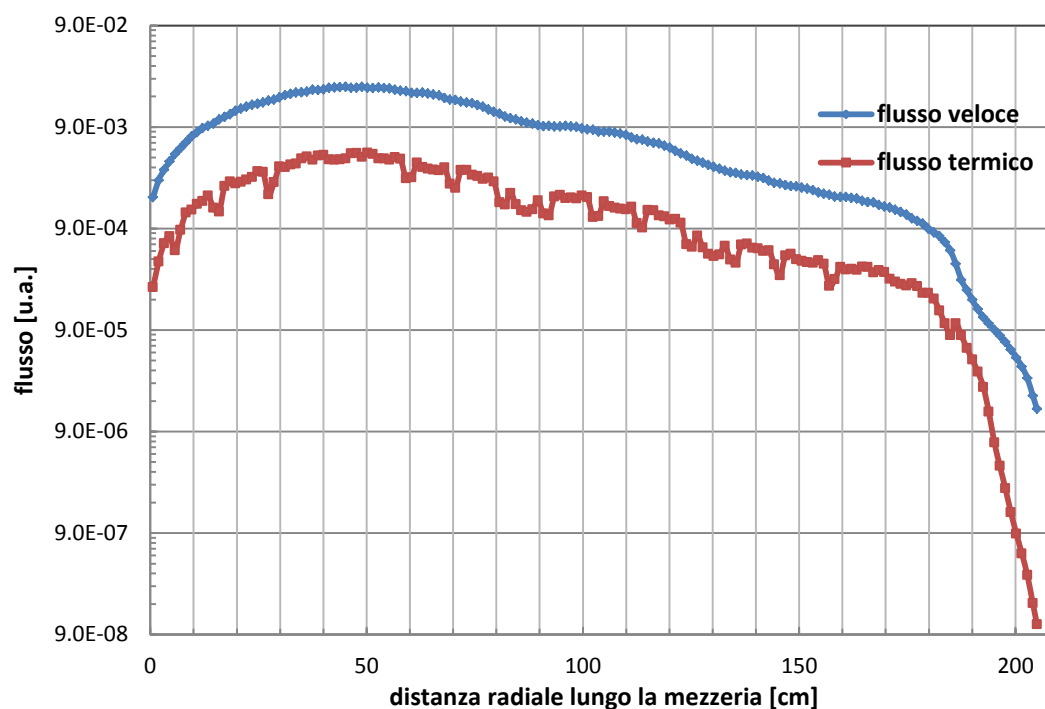


Figura 6.50: profilo di flusso veloce e termico - 8.5A+1R

I risultati ottenuti in termini per i parametri di cella, vengono proposti nella Tab. 6.17.

Tabella 6.17: parametri di cella configurazione 8.5A+1R

	1A+1R		8.5A+1R		var_Ass	Var_rif
	Assembly	Riflettore	Assembly	Riflettore	[%]	[%]
K_{eff}	0.91422		0.98752		7330	
Σ_{a1}	9.19E-03	4.94E-03	9.30E-03	5.63E-03	1.21	13.87
Σ_{a2}	7.62E-02	1.27E-01	6.76E-02	1.27E-01	-11.31	0.04
Σ_{f1}	2.16E-03	0.00E+00	2.27E-03	0.00E+00	5.06	-
Σ_{f2}	4.14E-02	0.00E+00	4.45E-02	0.00E+00	7.39	-
Σ_{1-2}	1.70E-02	2.10E-02	1.62E-02	2.01E-02	-4.57	-4.18
Σ_{2-1}	1.52E-03	3.99E-03	1.42E-03	4.33E-03	-6.49	8.60
Σ_{tot1}	5.33E-01	8.78E-01	5.27E-01	9.23E-01	-1.07	5.07
Σ_{tot2}	1.28E+00	2.12E+00	1.25E+00	2.16E+00	-2.41	2.07
$v\Sigma_{f1}$	5.56E-03	0.00E+00	5.83E-03	0.00E+00	4.92	-
$v\Sigma_{f2}$	1.01E-01	0.00E+00	1.08E-01	0.00E+00	6.96	-
D_1	1.52	0.78	1.50	0.71	-1.18	-9.17
D_2	0.39	0.20	0.40	0.20	2.30	-2.40
Σ_{tr1}	2.20E-01	4.26E-01	2.22E-01	4.67E-01	1.09	9.51
Σ_{tr2}	8.53E-01	1.63E+00	8.39E-01	1.67E+00	-1.59	2.67
φ_1	7.36E-02	9.95E-03	4.05E-02	1.63E-04	-44.98	-98.36
φ_2	1.57E-02	1.89E-03	9.08E-03	2.99E-05	-42.14	-98.42

La configurazione 8.5A+1R, a differenza della 2 A+1R, restituisce dati di cella in buon accordo con quelli ricavati da una configurazione standard 1A+1R. Ciò è attribuibile ad un effetto di compensazione che le diverse tipologie di assembly procurano sul risultato finale.

6.4 - Il riflettore EPR

Il riflettore pesante adottato nei sistemi nucleari EPR è stato modellizzato utilizzando i dati geometrici dei sistemi US-EPR. La modellizzazione del riflettore è stata realizzata in due zone in modo tale da poter utilizzare i dati ottenibili delle sezione d'urto efficaci nei calcoli di nocciolo in diffusione che suddividono il sistema riflettente in due o tre zone per come mostrato nella Fig. 6.54 tratta dal benchmark UAM.

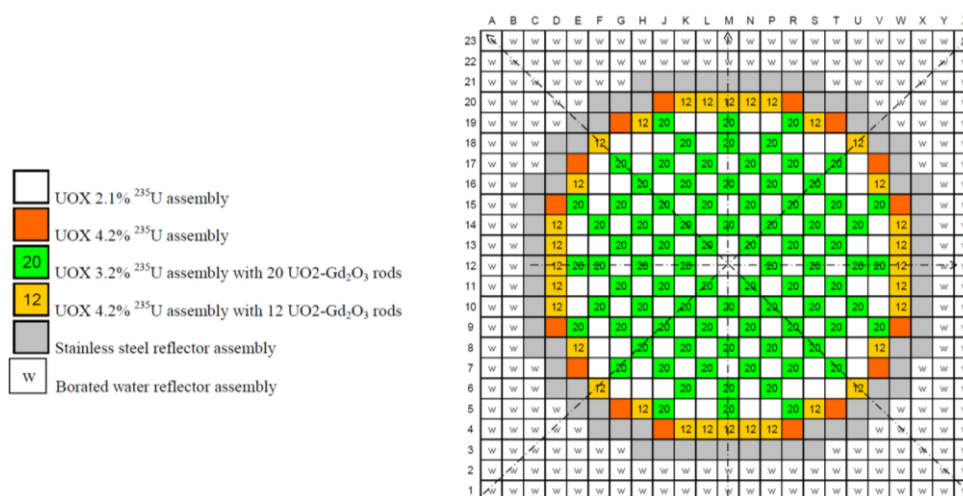


Figura 6.51: nocciolo UOX - benchmark UAM

Le dimensioni geometriche utilizzate per realizzare il calcolo delle sezioni d'urto efficaci a due zone per il riflettore EPR nella zona centrale sono riportate nella Fig. 7.26.

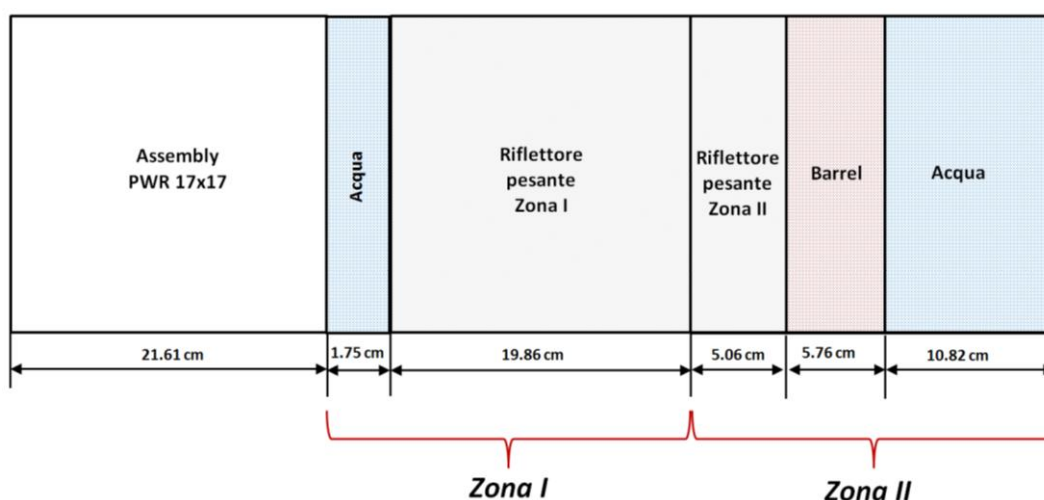


Figura 6.52: disposizione geometrica riflettore EPR - zona di mezzeria

Il calcolo in zona di mezzeria è stato realizzato per una concentrazione di boro pari a 0 e 1300 ppm in condizioni di HZP (570 K). In tale configurazione di calcolo sono stati anche valutati i fattori di discontinuità (ADF) tra l'intera area del riflettore (zona I + zona II) e l'assembly PWR 17x17. La distribuzione delle mesh computazionali e dei materiali viene riportata nelle Fig. 6.53 e 6.54.

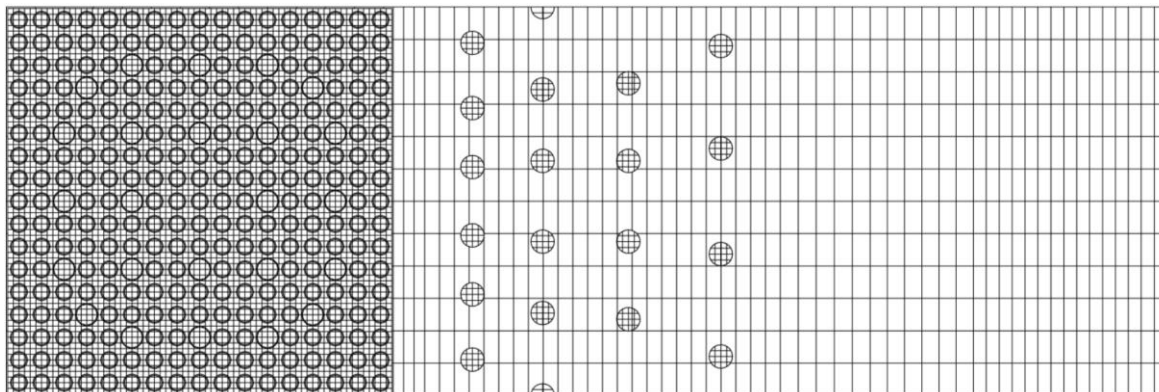


Figura 6.53: mesh computazionali riflettore EPR - configurazione centrale

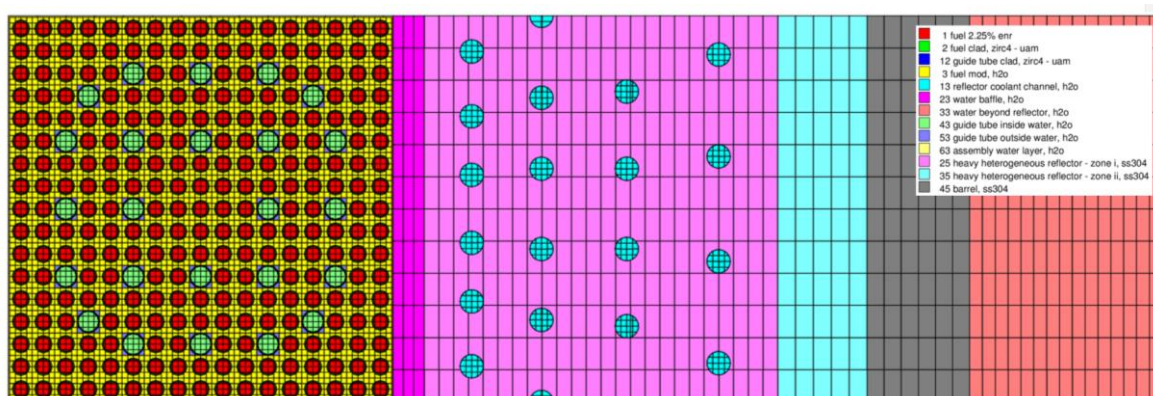


Figura 6.54: distribuzione dei materiali riflettore EPR - configurazione centrale

I risultati ottenuti, in termini di mappe di flusso veloce e termico, sono riportati nelle Fig. 6.55 e 6.56.

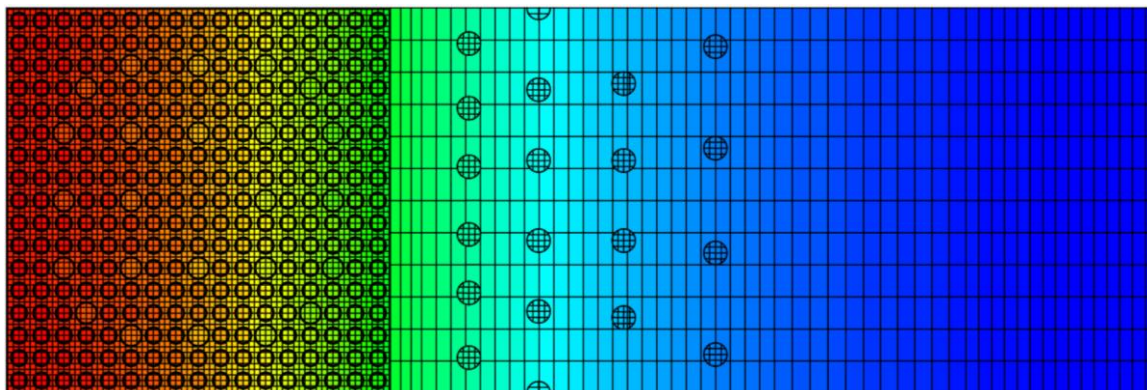


Figura 6.55: mappa di flusso veloce riflettore EPR – configurazione centrale

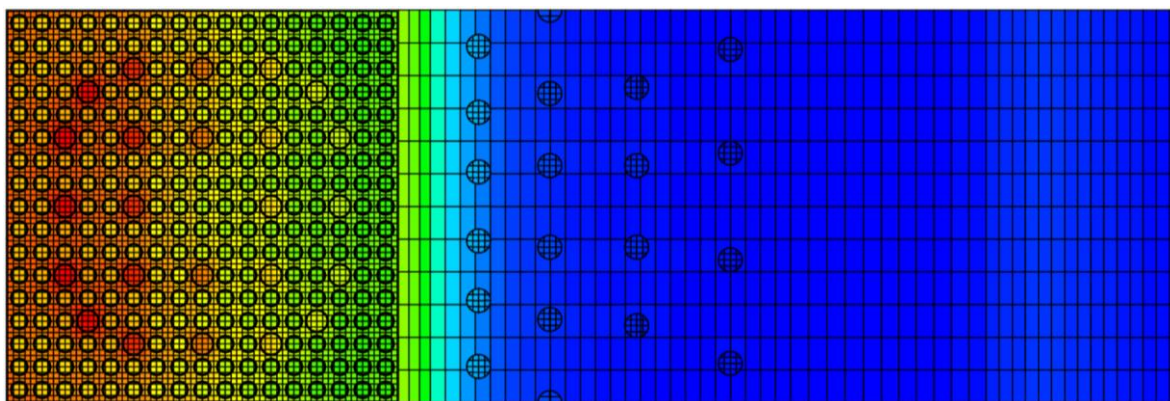


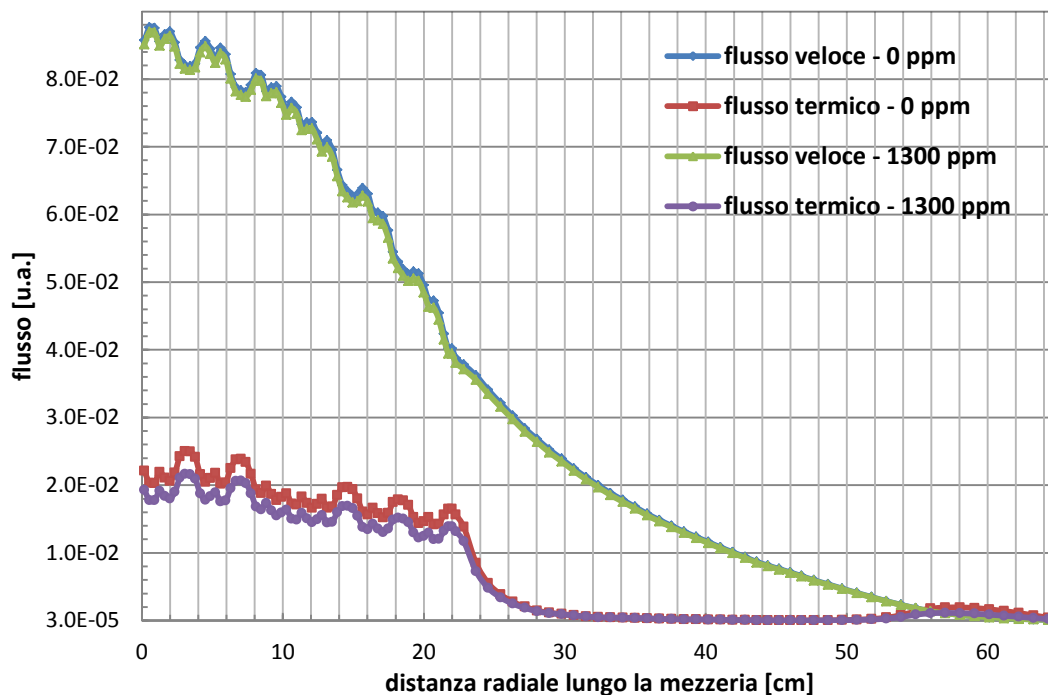
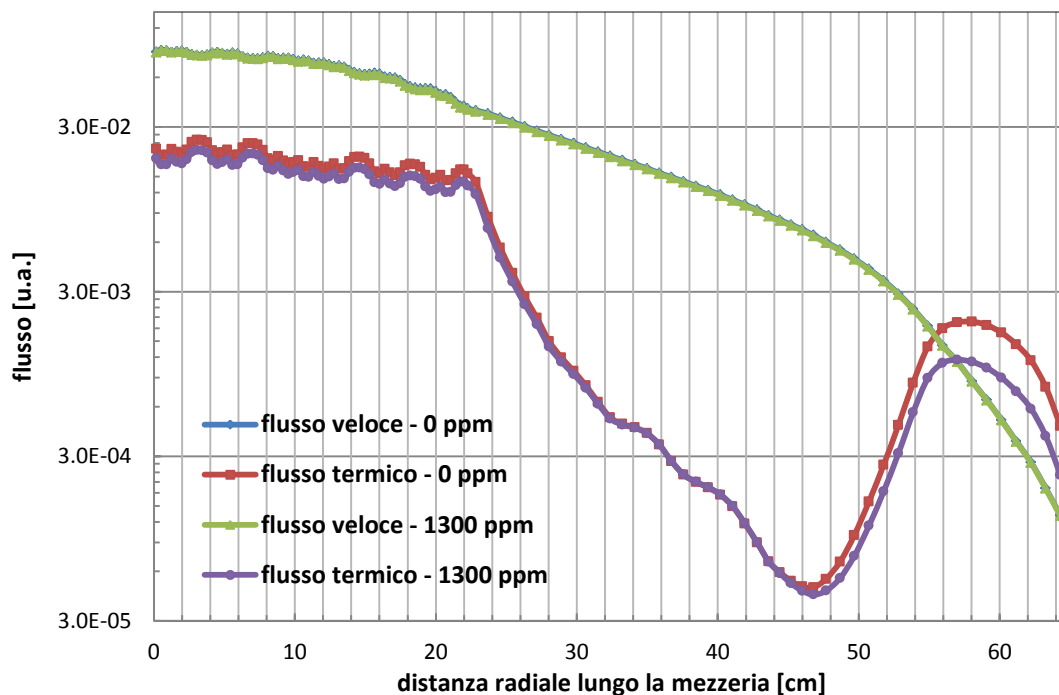
Figura 6.56: mappa di flusso termico riflettore EPR – configurazione centrale

Il valore ottenuto con SCALE 6.1.3 in termini di parametri di cella viene proposto nella Tab. 6.18.

Tabella 6.18: dati di cella riflettore EPR – due zone

	2 zone – 0 ppm di boro			2 zone – 1300 ppm di boro		
	Assembly	Zona I	Zona II	Assembly	Zona I	Zona II
K_{eff}	1.12360			0.94394		
Σ_{a1}	8.44E-03	3.32E-03	2.90E-03	8.93E-03	3.52E-03	3.08E-03
Σ_{a2}	6.52E-02	6.25E-02	2.22E-02	7.76E-02	7.41E-02	4.51E-02
Σ_{f1}	2.13E-03	0.00E+00	0.00E+00	2.14E-03	0.00E+00	0.00E+00
Σ_{f2}	4.25E-02	0.00E+00	0.00E+00	4.16E-02	0.00E+00	0.00E+00
Σ_{1-2}	1.77E-02	7.80E-03	7.60E-03	1.82E-02	8.00E-03	7.75E-03
Σ_{2-1}	1.08E-03	2.72E-03	7.77E-04	1.26E-03	3.12E-03	1.32E-03
Σ_{tot1}	5.41E-01	5.94E-01	6.00E-01	5.47E-01	6.00E-01	6.04E-01
Σ_{tot2}	1.34E+00	1.46E+00	1.87E+00	1.34E+00	1.45E+00	1.83E+00
$v\Sigma_{f1}$	5.48E-03	0.00E+00	0.00E+00	5.51E-03	0.00E+00	0.00E+00
$v\Sigma_{f2}$	1.03E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00
D_1	1.52	1.04	0.92	1.51	1.03	0.91
D_2	0.37	0.31	0.27	0.37	0.31	0.28
Σ_{tr1}	2.19E-01	3.20E-01	3.61E-01	2.21E-01	3.24E-01	3.65E-01
Σ_{tr2}	8.95E-01	1.08E+00	1.22E+00	8.92E-01	1.07E+00	1.20E+00
ϕ_1	7.12E-02	2.17E-02	3.14E-03	7.04E-02	2.14E-02	3.10E-03
ϕ_2	1.89E-02	2.45E-03	8.05E-04	1.64E-02	2.15E-03	4.69E-04
adf_1	0.7209			0.7425		
adf_2	3.0522			3.2504		

L'andamento dei profili di flusso termico e veloce nella zona di mezzeria sono riportati nella Fig. 6.57 e 6.58.

Figura 6.57: profili di flusso veloce e termico (*lin/lin*) - zona centraleFigura 6.58: profilo di flusso veloce e termico (*log/lin*) - zona centrale

Il riflettore EPR presenta una diversa modellizzazione al variare della direzione angolare dalla zona di mezzeria. Con l'obiettivo di voler calcolare i parametri di cella per zone diverse da quella di mezzeria, si è provveduto a realizzare una modellizzazione esatta delle diverse zone periferiche di riflettore adottando una suddivisione zonale come evidenziato in Fig. 6.59.

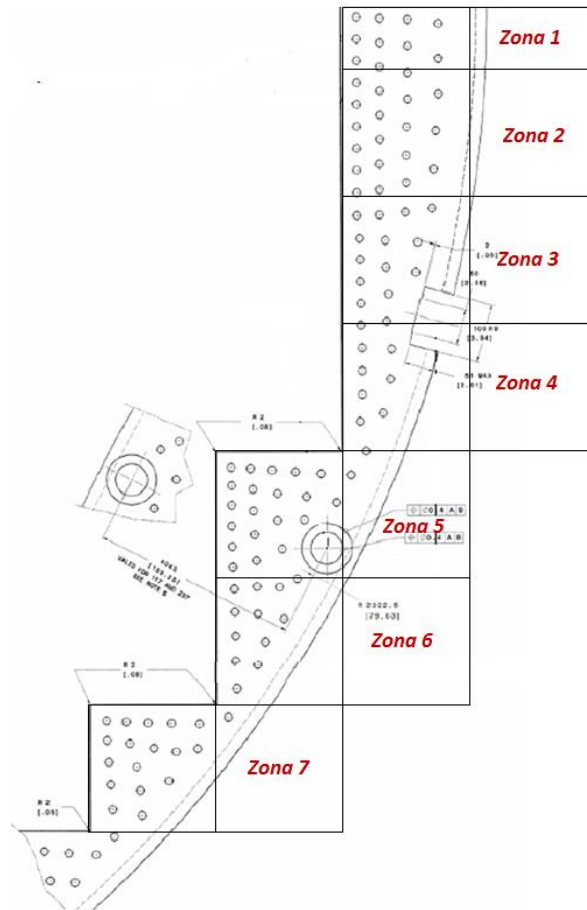


Figura 6.59: modellizzazione geometrica a due zone - riflettore EPR

Nei successivi paragrafi vengono presentati i risultati ottenuti sulle sezioni d'urto efficaci per alcune delle zone periferiche modellizzate.

6.4.1 - Zona 3

La modellizzazione geometrica della zona 3 e la distribuzione dei materiali sono riportati nelle Fig. 6.60 e Fig. 6.61.

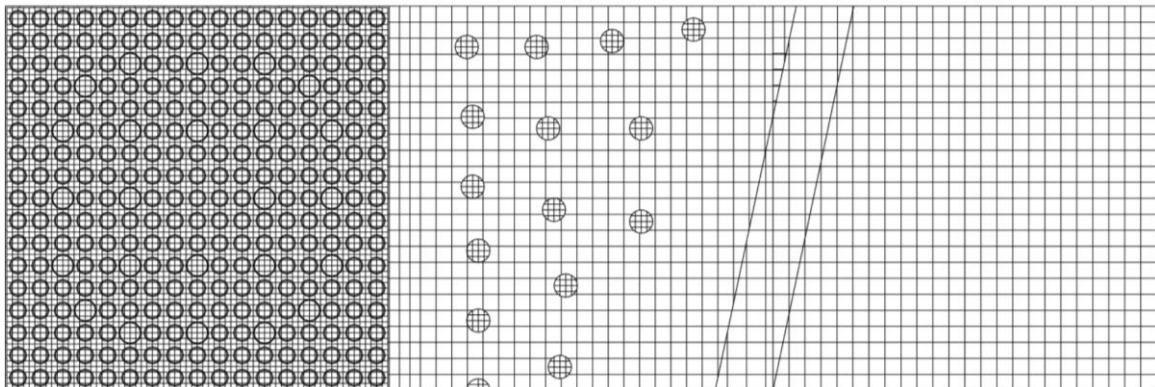


Figura 6.60: mesh computazionali riflettore EPR - zona 3

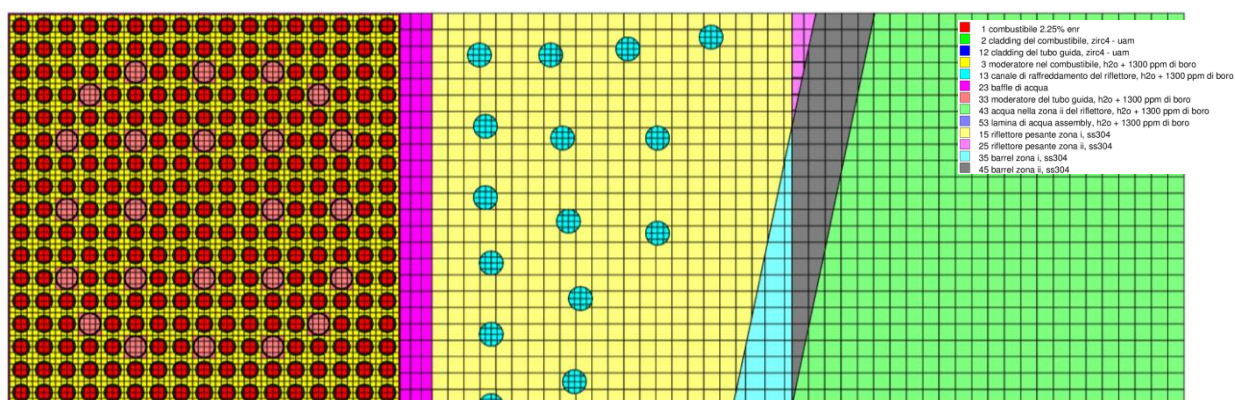


Figura 6.61: distribuzione dei materiali riflettore EPR - zona 3

I risultati ottenuti, in termini di flusso termico e veloce, vengono riportati in Fig. 6.62 e 6.63.

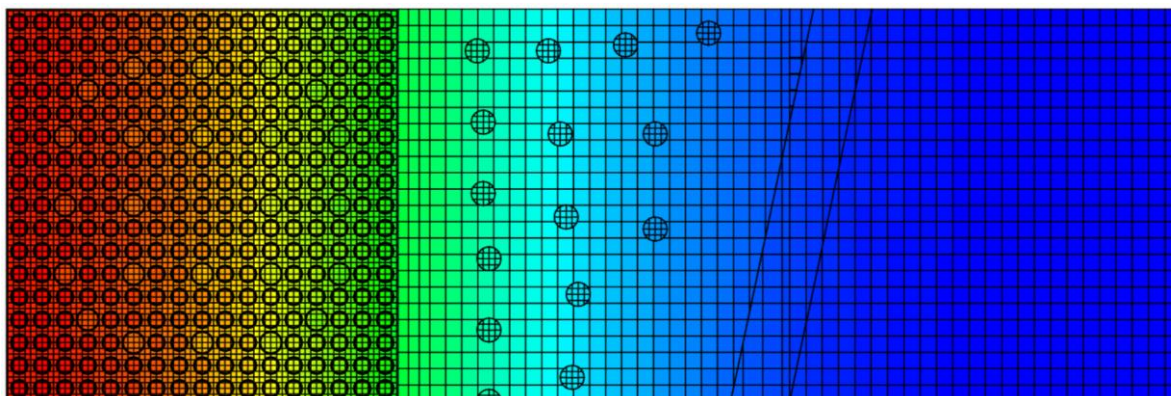


Figura 6.62: mappa di flusso veloce riflettore EPR - zona 3

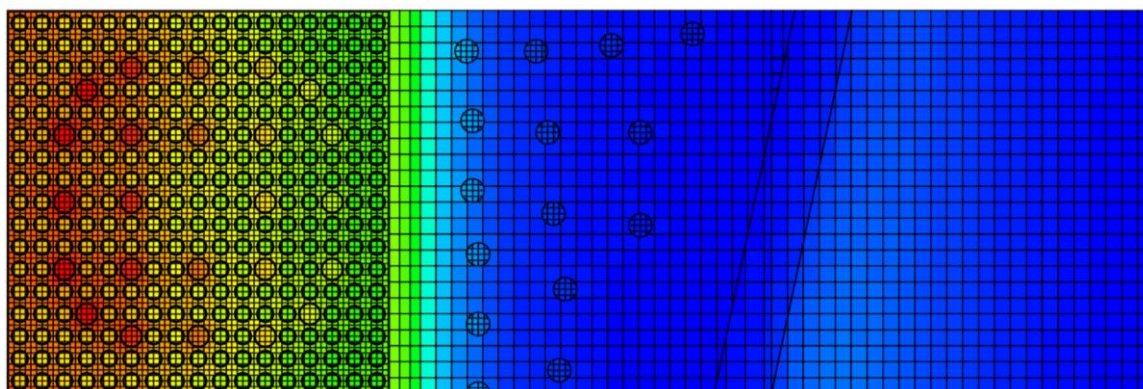
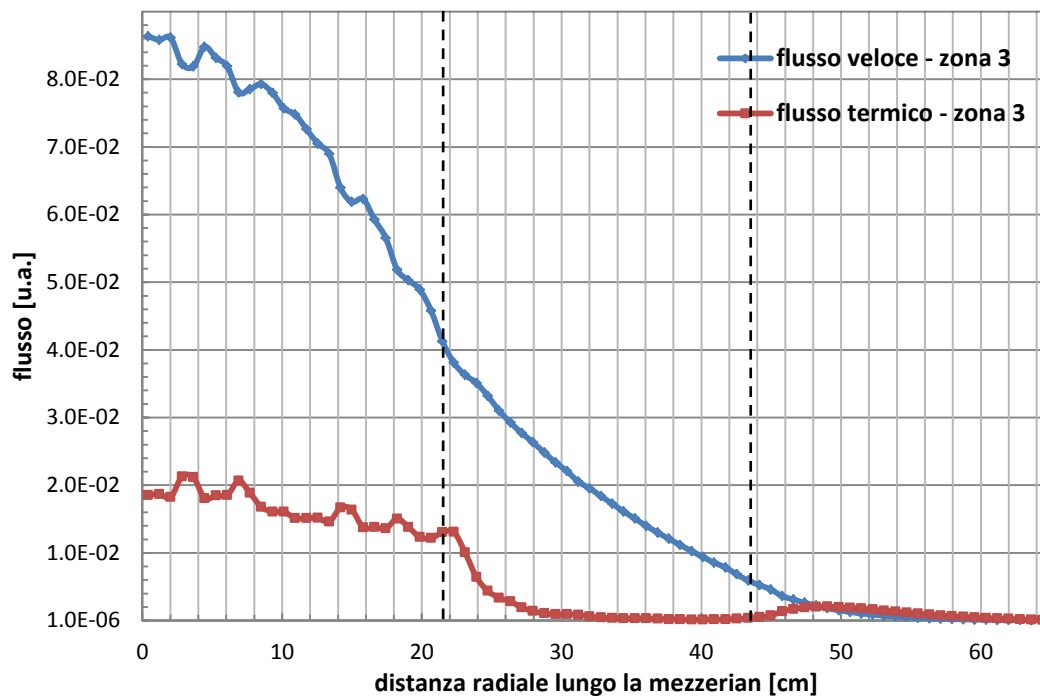
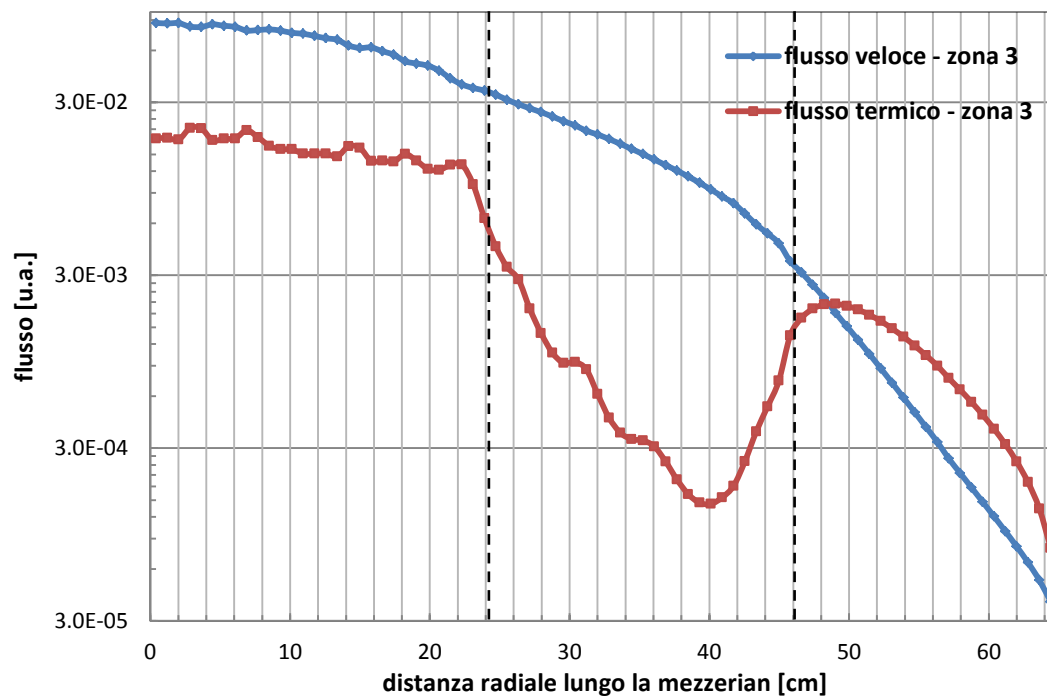


Figura 6.63: mappa di flusso termico riflettore EPR - zona 3

L'andamento del profilo di flusso veloce e termico in zona di mezzera viene riportato nelle Fig. 6.64 e 6.65.

Figura 6.64: profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (*lin/lin*) - zona 3Figura 6.65: profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (*log/lin*) - zona 3

Il valore dei parametri di cella ottenuti per le due zone in cui è suddiviso il riflettore della zona 3 sono riportati nella Tab. 6.19.

Tabella 6.19: parametri di cella riflettore EPR - zona 3

	Zona 1			Zona 3			Var [%]		
	Assembly	cella I	cella II	Assembly	cella I	cella II	Assembly	cella I	cella II
K_{eff}	0.94394			0.94344			-50		
Σ_{a1}	8.93E-03	3.52E-03	3.08E-03	9.04E-03	3.33E-03	2.36E-03	1.28	-5.45	-23.38
Σ_{a2}	7.76E-02	7.41E-02	4.51E-02	7.83E-02	7.02E-02	3.94E-02	0.90	-5.31	-12.66
Σ_{f1}	2.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	2.17E-03	0.00E+00	0.00E+00	1.35	-	-
Σ_{f2}	4.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	4.22E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.52	-	-
Σ_{1-2}	1.82E-02	8.00E-03	7.75E-03	1.80E-02	8.93E-03	3.51E-02	-0.88	11.60	353.08
Σ_{2-1}	1.26E-03	3.12E-03	1.32E-03	1.26E-03	2.88E-03	7.23E-04	-0.16	-7.78	-45.19
Σ_{tot1}	5.47E-01	6.00E-01	6.05E-01	5.45E-01	5.95E-01	7.44E-01	-0.33	-0.88	23.08
Σ_{tot2}	1.34E+00	1.45E+00	1.84E+00	1.33E+00	1.49E+00	1.92E+00	-0.97	2.90	4.63
$v\Sigma_{f1}$	5.51E-03	0.00E+00	0.00E+00	5.58E-03	0.00E+00	0.00E+00	1.31	-	-
$v\Sigma_{f2}$	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.03E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.68	-	-
D_1	1.506	1.027	0.914	1.502	1.069	1.012	-0.27	4.09	10.72
D_2	0.374	0.311	0.278	0.375	0.308	0.271	0.27	-0.96	-2.52
Σ_{tr1}	2.21E-01	3.24E-01	3.65E-01	2.22E-01	3.12E-01	3.29E-01	0.32	-3.82	-9.81
Σ_{tr2}	8.92E-01	1.07E+00	1.20E+00	8.88E-01	1.08E+00	1.23E+00	-0.45	0.65	2.59
ϕ_1	7.05E-02	2.14E-02	3.10E-03	7.05E-02	2.10E-02	1.33E-03	0.06	-1.74	-57.15
ϕ_2	1.64E-02	2.15E-03	4.69E-04	1.64E-02	2.28E-03	1.04E-03	-0.25	6.04	121.19
adf1	0.74252			0.83277			12.15		
adf2	3.25042			2.29995			-29.24		

La variazione percentuale relativa è stata valutata scegliendo come riferimento i calcoli di cella ottenuti in zona di centrale mezzera (Zona 1). La differenza di circa un fattore 4.5 del valore della sezione d'urto di scattering 1-2 è dovuta al significativo aumento (+39 vol%) della frazione volumetrica di acqua nella cella II della zona 3 rispetto alla cella II della zona 1.

6.4.2 - Zona 4

La modellizzazione geometrica della zona 4 e la distribuzione dei materiali sono riportati nelle Fig. 6.66 e 6.67.

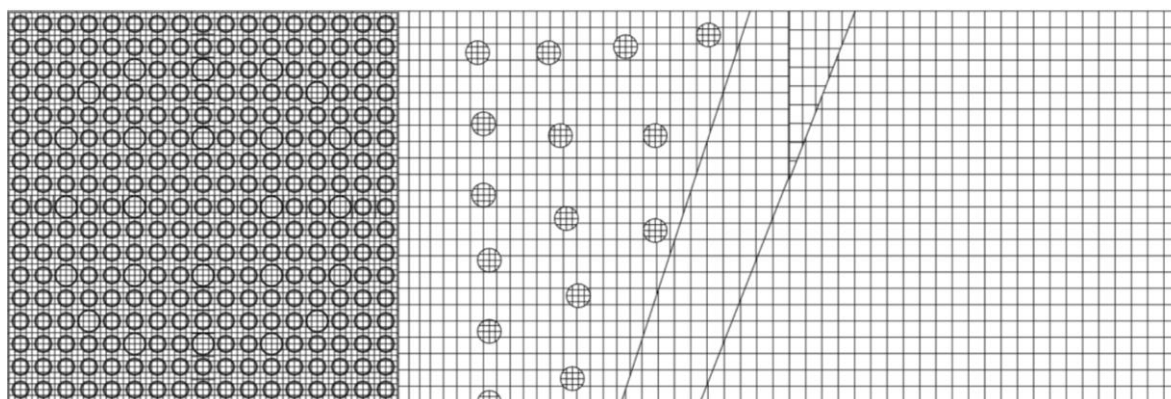


Figura 6.66: mesh computazionali riflettore EPR - zona 4

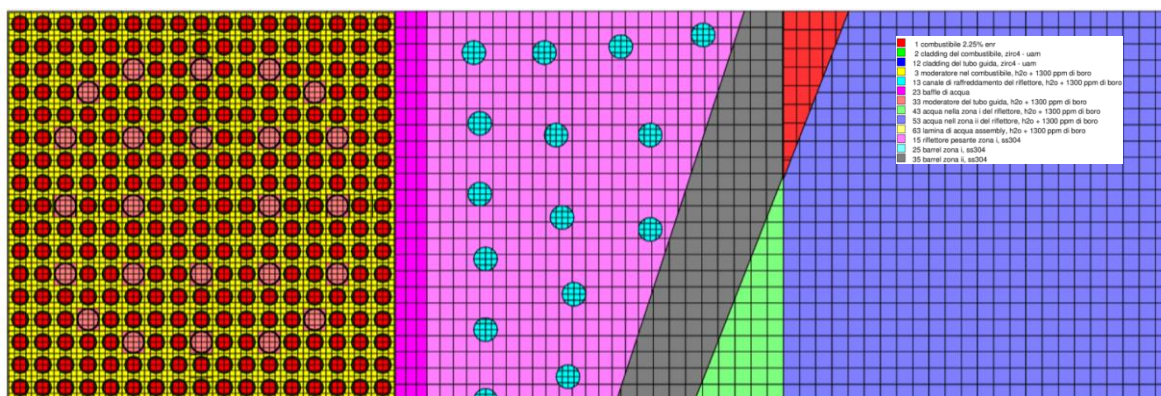


Figura 6.67: disposizione dei materiali riflettore EPR - zona 4

I risultati ottenuti, in termini di flusso termico e veloce, vengono riportati in Fig. 6.68 e Fig. 6.69.

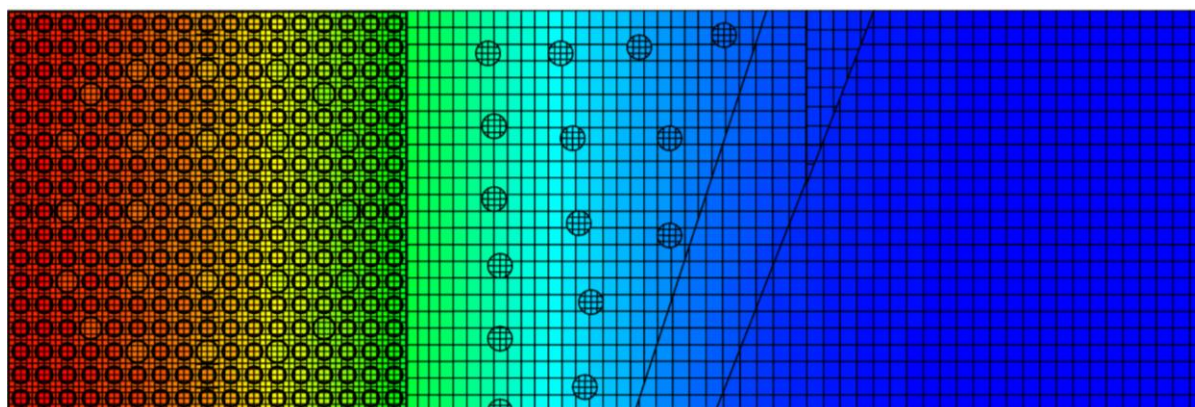


Figura 6.68: mappa di flusso veloce riflettore EPR - zona 4

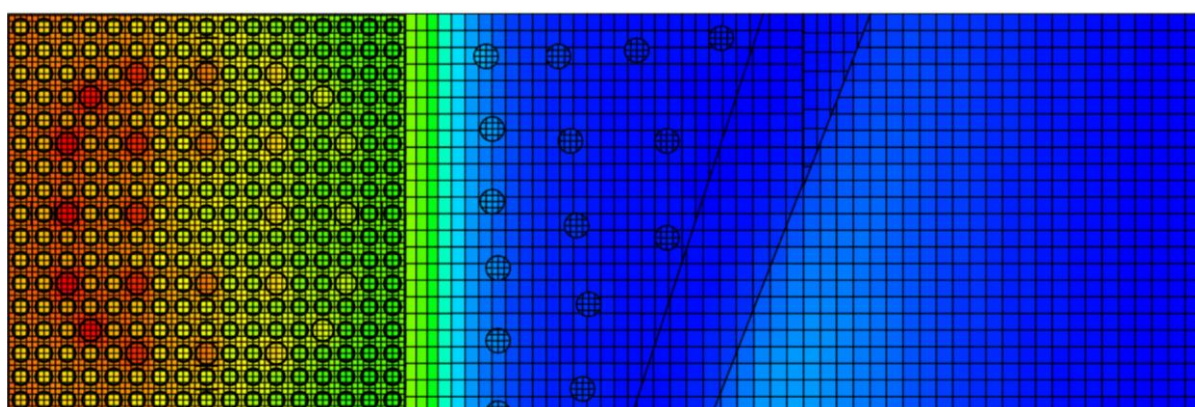
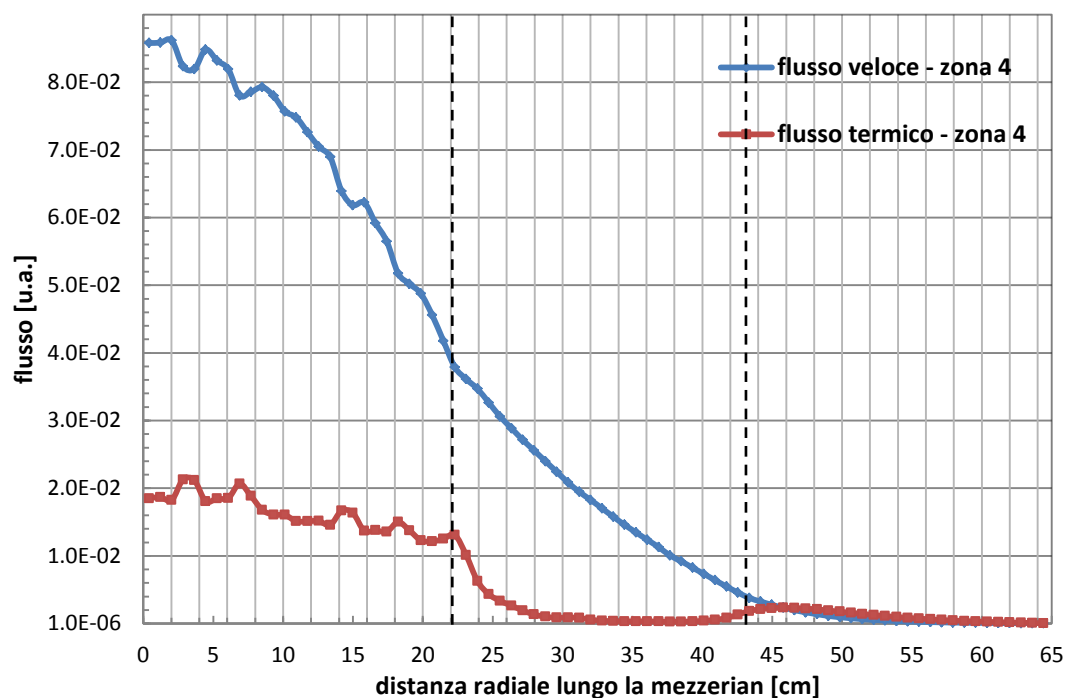
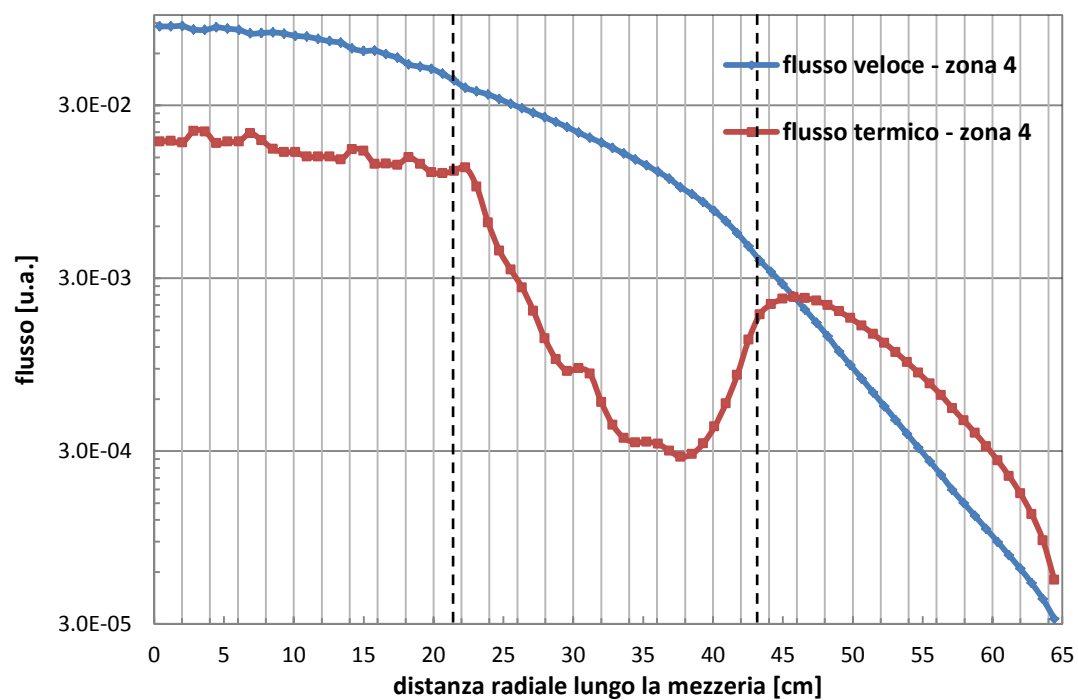


Figura 6.69: mappa di flusso termico riflettore EPR - zona 4

L'andamento del profilo di flusso veloce e termico in zona di mezzzeria viene riportato nelle Fig. 6.70 e 6.71.


 Figura 6.70: profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (*lin/lin*) - zona 4

 Figura 6.71: profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (*log/lin*) - zona 4

Il valore dei dati di cella valutati con SCALE 6.1.3 viene riportato nella Tab. 6.20.

Tabella 6.20: parametri di cella riflettore EPR - zona 4

	Zona 1			Zona 4			Var [%]		
	Assembly	cella I	cella II	Assembly	cella I	cella II	Assembly	cella I	cella II
K_{eff}	0.94394			0.94344			- 50 pcm		
Σ_{a1}	8.93E-03	3.52E-03	3.08E-03	8.92E-03	3.44E-03	1.89E-03	-0.11	-2.27	-38.64
Σ_{a2}	7.76E-02	7.41E-02	4.51E-02	7.76E-02	7.26E-02	3.63E-02	0.00	-2.02	-19.51
Σ_{f1}	2.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	2.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00	-	-
Σ_{f2}	4.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	4.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00	-	-
Σ_{1-2}	1.82E-02	8.00E-03	7.60E-03	1.81E-02	9.03E-03	4.98E-02	-0.55	12.88	555.26
Σ_{2-1}	1.26E-03	3.12E-03	7.77E-04	1.26E-03	2.78E-03	5.95E-04	0.00	-10.90	-23.42
Σ_{tot1}	5.47E-01	6.00E-01	6.04E-01	5.47E-01	5.96E-01	8.05E-01	0.00	-0.67	33.28
Σ_{tot2}	1.34E+00	1.45E+00	1.83E+00	1.34E+00	1.48E+00	1.96E+00	0.00	2.07	7.10
$v\Sigma_{f1}$	5.51E-03	0.00E+00	0.00E+00	5.51E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00	-	-
$v\Sigma_{f2}$	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00	-	-
D_1	1.506	1.027	0.914	1.507	1.058	1.125	0.07	3.02	23.09
D_2	0.374	0.311	0.278	0.374	0.307	0.268	0.00	-1.29	-3.60
Σ_{tr1}	2.21E-01	3.24E-01	3.65E-01	2.21E-01	3.15E-01	2.96E-01	0.00	-2.78	-18.90
Σ_{tr2}	8.92E-01	1.07E+00	1.20E+00	8.92E-01	1.08E+00	1.24E+00	0.00	0.93	3.33
ϕ_1	7.05E-02	2.14E-02	3.10E-03	7.05E-02	1.90E-02	8.57E-04	0.00	-11.02	-72.32
ϕ_2	1.64E-02	2.15E-03	4.69E-04	1.63E-02	2.27E-03	1.05E-03	-0.61	5.68	123.85
adf_1	0.74252			0.83516			12.48		
adf_2	3.25042			2.27254			-30.08		

L'incremento della sezione d'urto di scattering 1-2 di circa un fattore 6.5 nella cella II della zona 5 rispetto alla stessa cella della zona 1 è attribuibile al notevole incremento (+46 %) della frazione volumetrica d'acqua nella cella II della zona 5 rispetto alla cella II della zona 3.

6.4.3 - Zona 5

La modellizzazione geometrica della zona 5 e la distribuzione dei materiali per come realizzati da SCALE 6.1.3, sono riportati nelle Fig. 6.72 e 6.73.

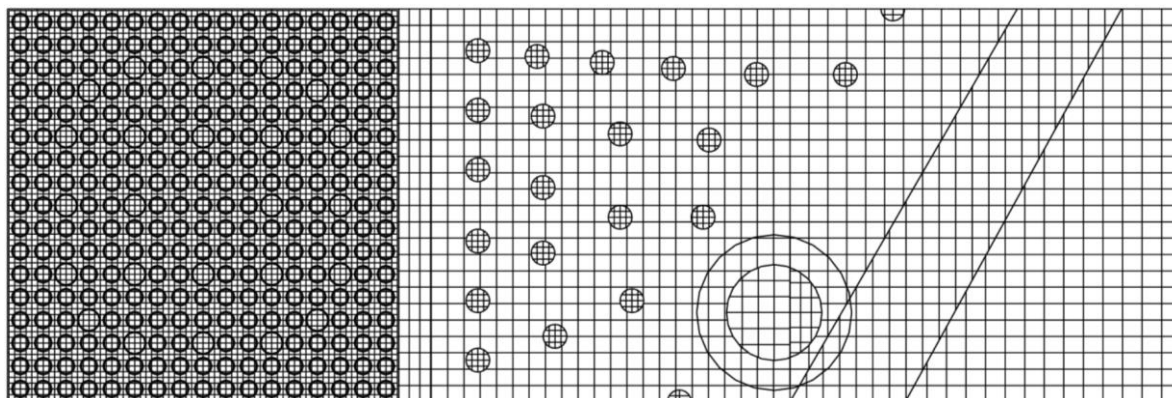


Figura 6.72: mesh computazionali riflettore EPR - zona 5

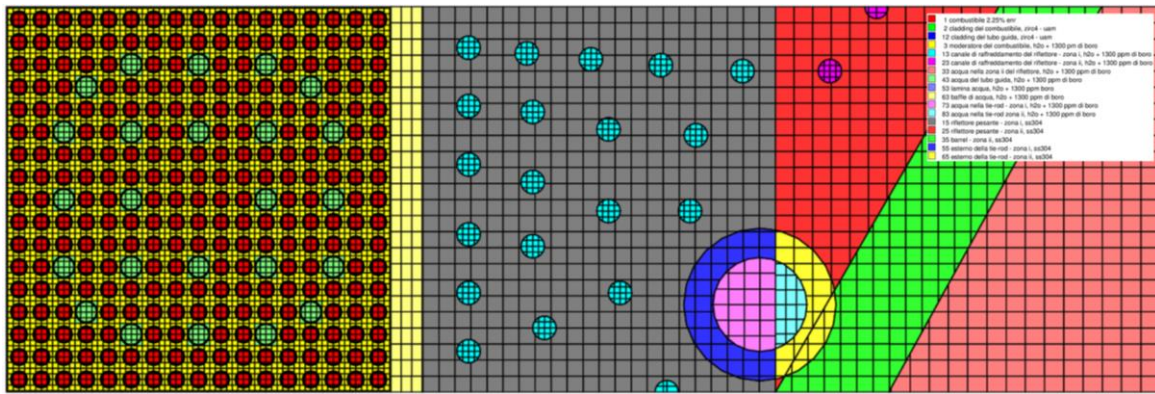


Figura 6.73: distribuzione dei materiali riflettore EPR - zona 5

I risultati ottenuti, in termini di flusso termico e veloce, vengono riportati in Fig. 6.74 e Fig. 6.75.

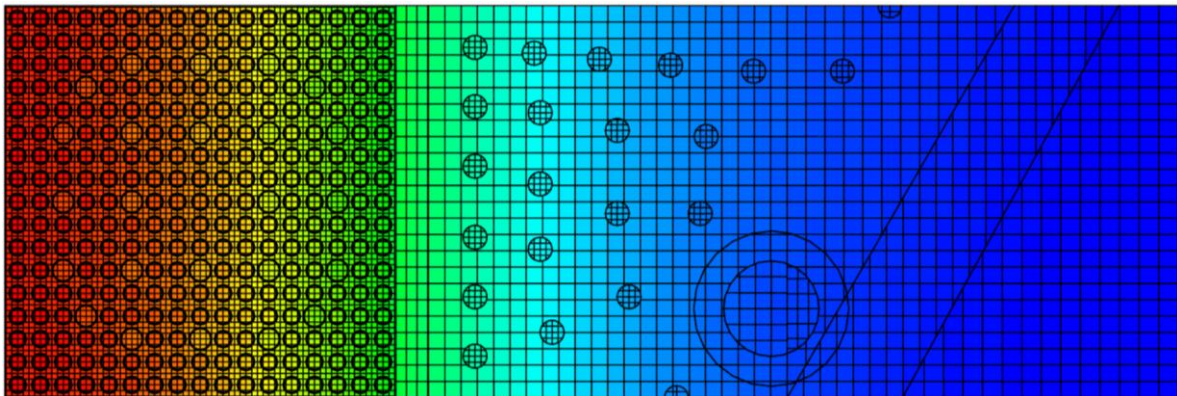


Figura 6.74: profilo di flusso veloce riflettore EPR - zona 5

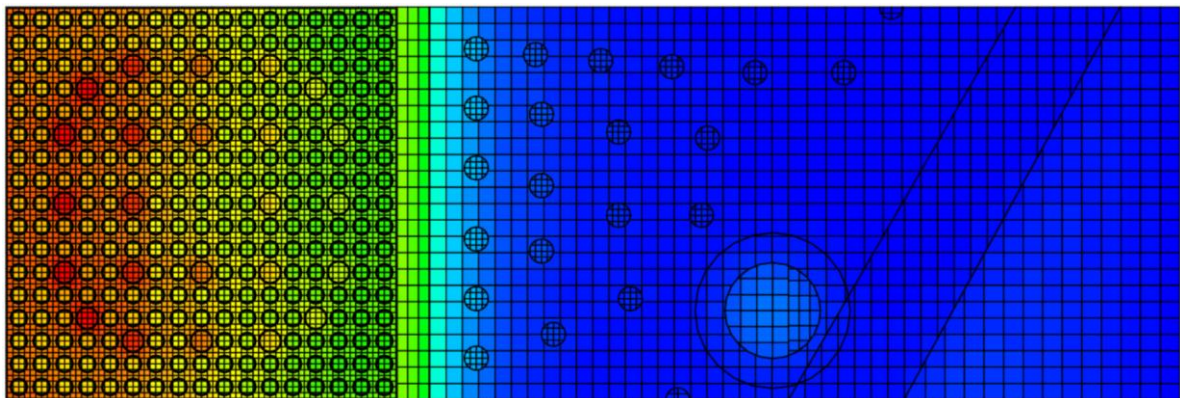
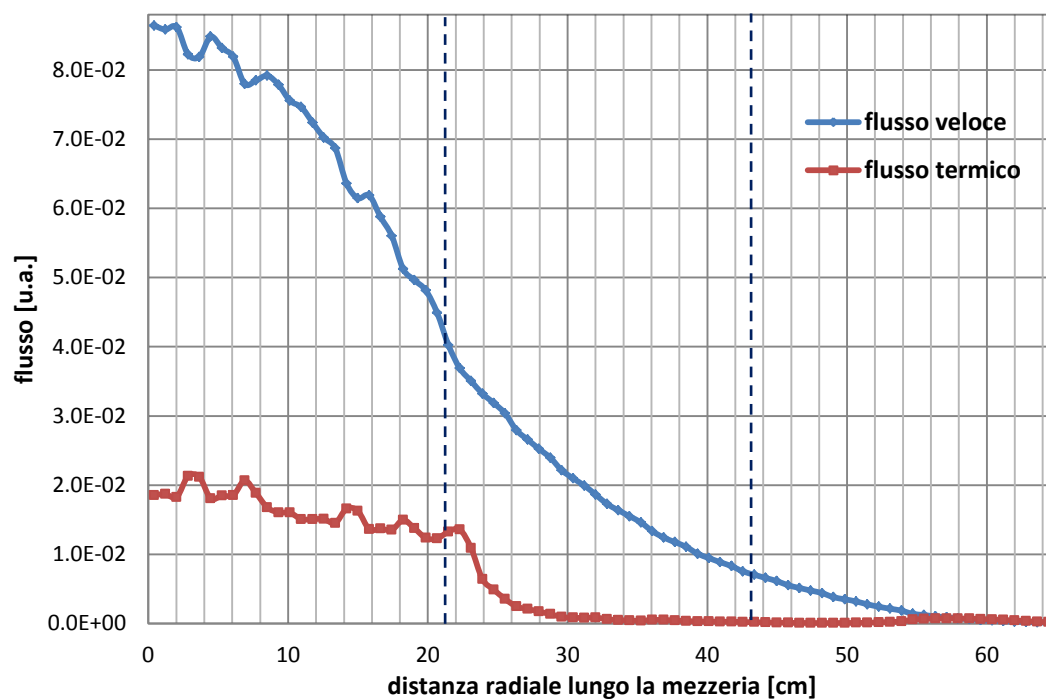
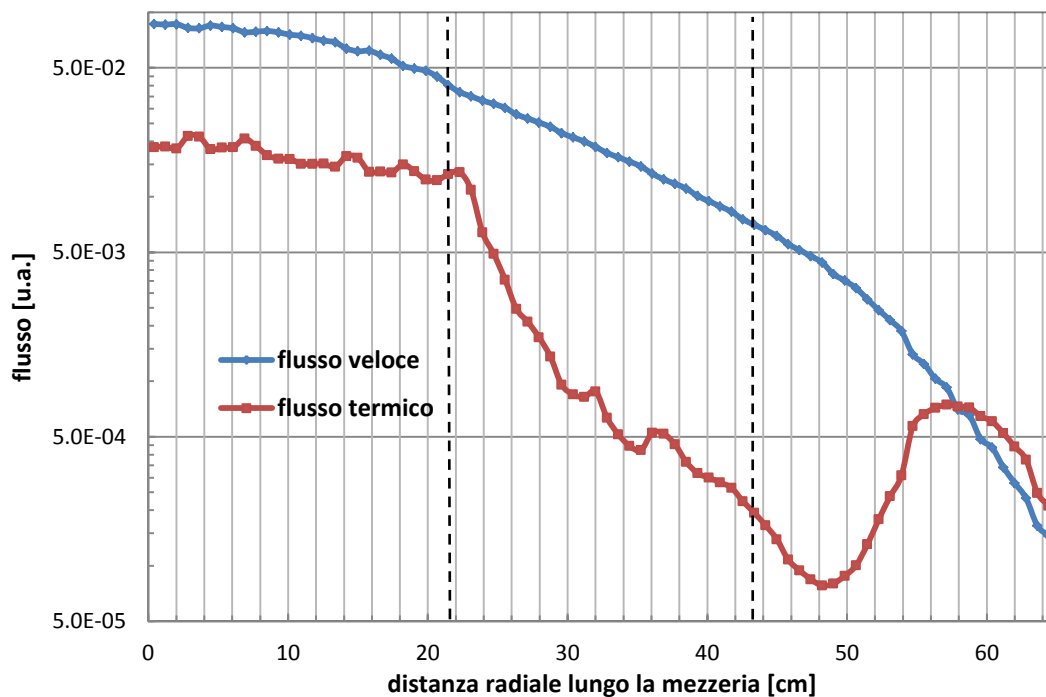


Figura 6.75: mappa di flusso termico riflettore EPR - zona 5

L'andamento del profilo di flusso veloce e termico in zona di mezzeria viene riportato nelle Fig. 6.76 e 6.77.


 Figura 6.76: profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (*lin/lin*) - zona 5

 Figura 6.77: profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (*log/lin*) - zona 5

Il valore dei parametri di cella ottenuti per le due zone in cui è suddiviso il riflettore della zona 5 sono riportati nella Tab. 6.21.

Tabella 6.21: parametri di cella riflettore EPR - zona 5

	Zona 1			Zona 5			Var [%]		
	Assembly	cella I	cella II	Assembly	cella I	cella II	Assembly	cella I	cella II
K_{eff}	0.94394			0.94201762			-192		
Σ_{a1}	8.93E-03	3.52E-03	3.08E-03	9.03E-03	3.45E-03	3.62E-03	1.17	-2.13	17.56
Σ_{a2}	7.76E-02	7.41E-02	4.51E-02	7.83E-02	7.02E-02	5.54E-02	0.87	-5.29	22.77
Σ_{f1}	2.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	2.17E-03	0.00E+00	0.00E+00	1.40	-	-
Σ_{f2}	4.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	4.22E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.41	-	-
Σ_{1-2}	1.82E-02	8.00E-03	7.60E-03	1.80E-02	1.00E-02	8.43E-03	-1.27	25.24	10.90
Σ_{2-1}	1.26E-03	3.12E-03	7.77E-04	1.26E-03	2.90E-03	1.95E-03	-0.15	-6.91	151.11
Σ_{tot1}	5.47E-01	6.00E-01	6.04E-01	5.45E-01	6.08E-01	6.26E-01	-0.36	1.25	3.72
Σ_{tot2}	1.34E+00	1.45E+00	1.83E+00	1.34E+00	1.49E+00	1.70E+00	-0.37	2.77	-7.15
$v\Sigma_{f1}$	5.51E-03	0.00E+00	0.00E+00	5.58E-03	0.00E+00	0.00E+00	1.34	-	-
$v\Sigma_{f2}$	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.03E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.78	-	-
D_1	1.506	1.027	0.914	1.503	1.503	1.503	-0.20	46.35	64.44
D_2	0.374	0.311	0.278	0.375	0.375	0.375	0.27	20.58	34.89
Σ_{tr1}	2.21E-01	3.24E-01	3.65E-01	2.22E-01	3.14E-01	3.71E-01	0.40	-3.21	1.78
Σ_{tr2}	8.92E-01	1.07E+00	1.20E+00	8.88E-01	1.08E+00	1.16E+00	-0.42	1.05	-3.75
ϕ_1	7.05E-02	2.10E-02	1.33E-03	7.04E-02	2.07E-02	2.53E-03	-0.09	-1.61	90.46
ϕ_2	1.64E-02	2.28E-03	1.04E-03	1.64E-02	2.46E-03	3.71E-04	-0.28	7.89	-64.37
adf_1	0.83277			0.79248			-4.84		
adf_2	2.29995			2.68479			16.73		

6.4.4 - Zona 6

La modellizzazione geometrica della zona 6 e la distribuzione dei materiali sono riportati nelle Fig. 6.78 e 6.79.

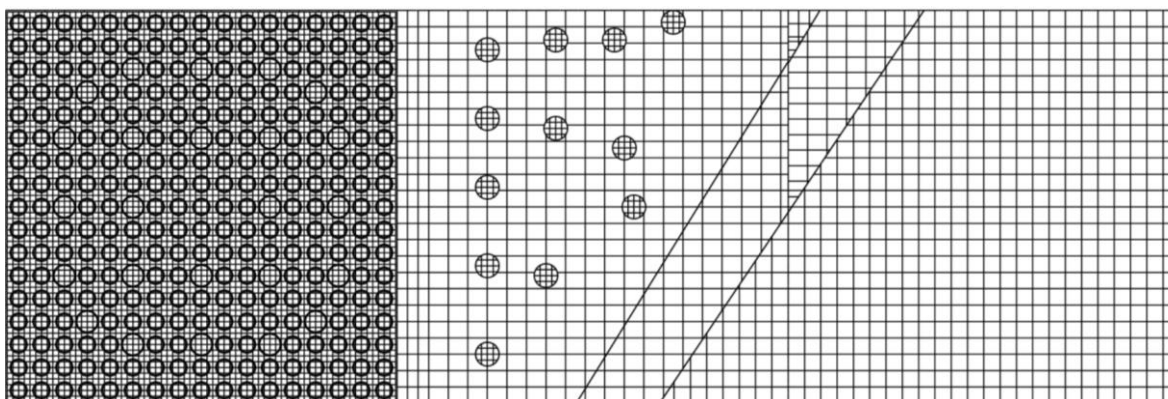


Figura 6.78: mesh computazionali riflettore EPR- zona 6

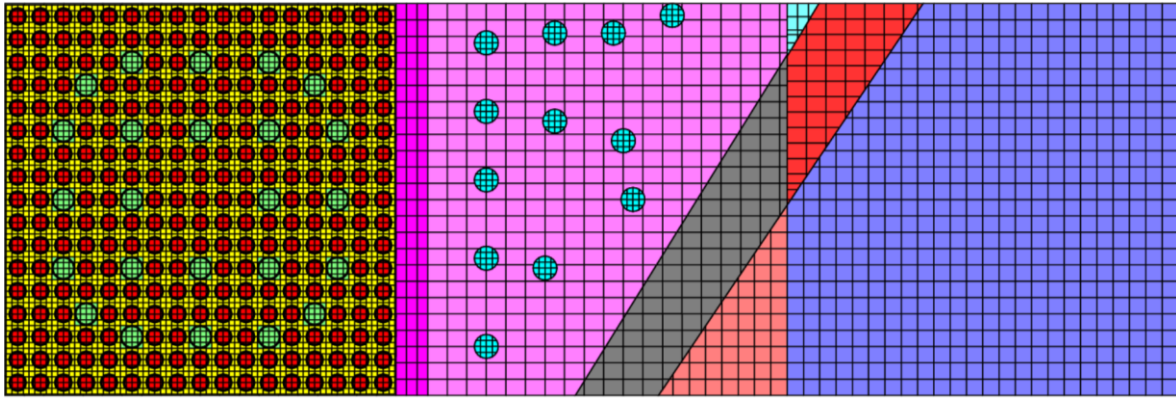


Figura: 6.79 distribuzione dei materiali riflettore EPR - zona 6

I risultati ottenuti, in termini di flusso termico e veloce, vengono riportati in Fig. 6.80-81

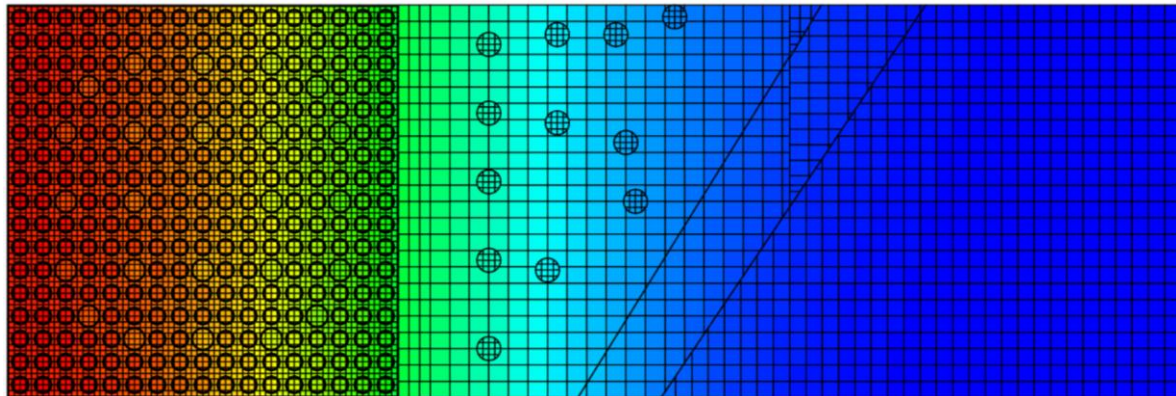


Figura 6.80: mappa di flusso veloce riflettore EPR - zona 6

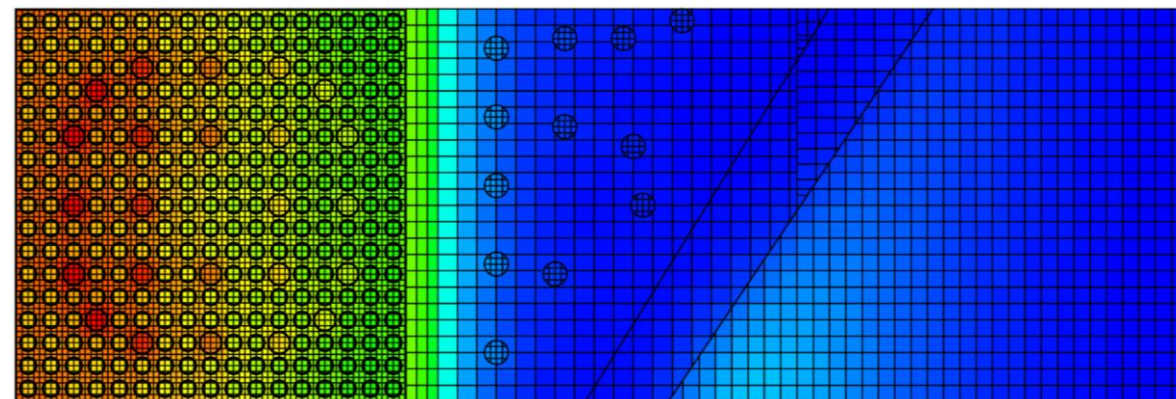


Figura 6.81: mappa di flusso termico riflettore EPR - zona 6

L'andamento del profilo di flusso veloce e termico in zona di mezzera viene riportato nelle Fig. 6.82 e 6.83.

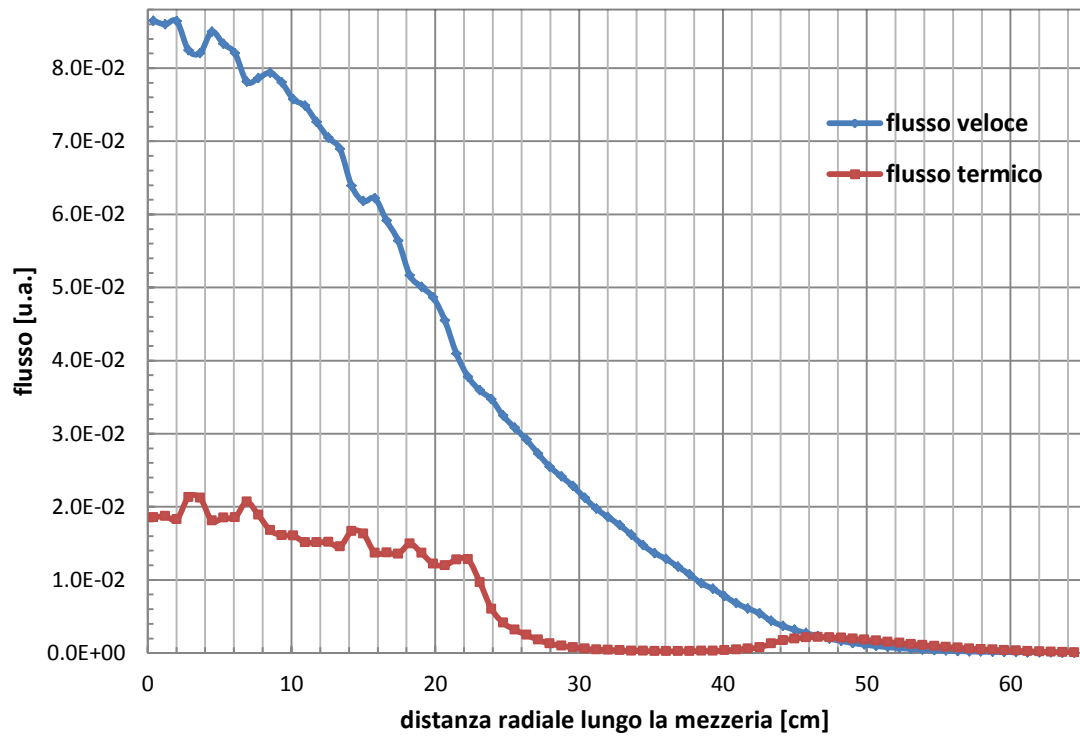
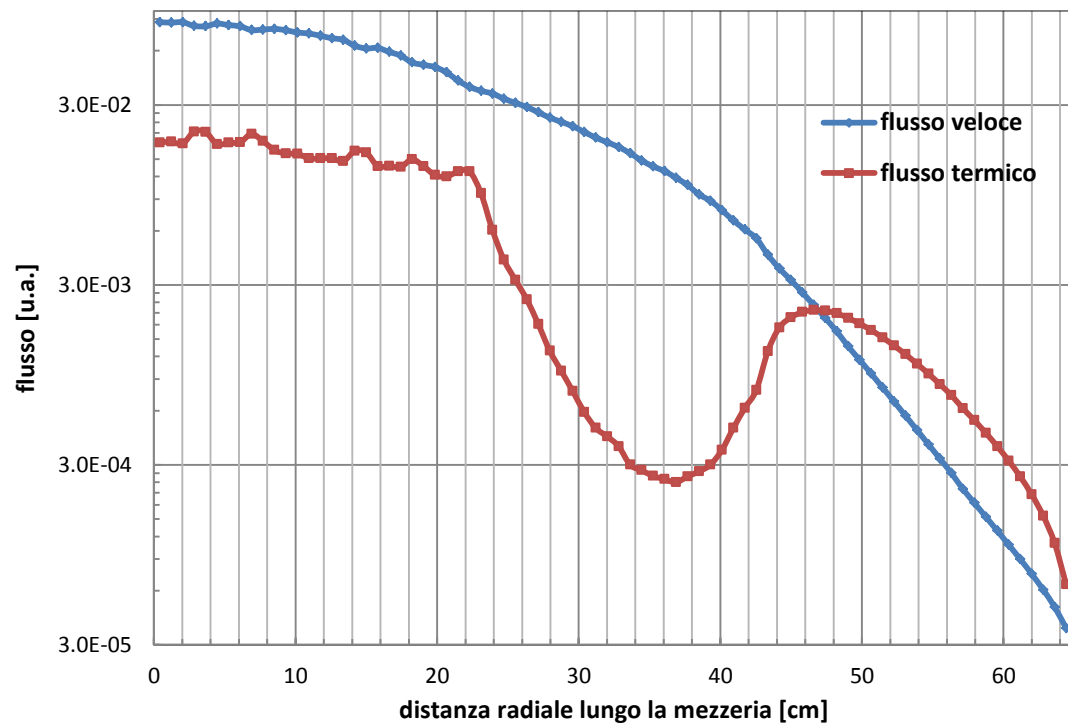

 Figura 6.82: profili di flusso veloce e termico riflettore EPR (*lin/lin*) - zona 6

 Figura 6.83: profili di flusso veloce e termico riflettore EPR (*log/lin*) - zona 6

Tabella 6.22: parametri di cella riflettore EPR - zona 6

	Zona 1			Zona 6			Var [%]		
	Assembly	cella I	cella II	Assembly	cella I	cella II	Assembly	cella I	cella II
K_{eff}	0.94394			0.94437			43		
Σ_{a1}	8.93E-03	3.52E-03	3.08E-03	8.92E-03	3.41E-03	2.99E-03	-0.07	-3.23	-2.94
Σ_{a2}	7.76E-02	7.41E-02	4.51E-02	7.76E-02	7.15E-02	4.23E-02	-0.03	-3.53	-6.11
Σ_{f1}	2.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	2.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	-0.04	-	-
Σ_{f2}	4.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	4.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	-0.09	-	-
Σ_{1-2}	1.82E-02	8.00E-03	7.75E-03	1.81E-02	8.96E-03	1.93E-02	-0.35	12.03	148.87
Σ_{2-1}	1.26E-03	3.12E-03	1.32E-03	1.26E-03	2.70E-03	8.14E-04	0.38	-13.44	-38.32
Σ_{tot1}	5.47E-01	6.00E-01	6.05E-01	5.47E-01	5.94E-01	6.43E-01	-0.05	-1.01	6.24
Σ_{tot2}	1.34E+00	1.45E+00	1.84E+00	1.34E+00	1.49E+00	1.89E+00	0.21	3.10	2.79
$v\Sigma_{f1}$	5.51E-03	0.00E+00	0.00E+00	5.50E-03	0.00E+00	0.00E+00	-0.10	-	-
$v\Sigma_{f2}$	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.27	-	-
D_1	1.506	1.027	0.914	1.507	1.058	1.000	0.04	3.03	9.40
D_2	0.374	0.311	0.278	0.374	0.306	0.272	-0.06	-1.58	-2.19
Σ_{tr1}	2.21E-01	3.24E-01	3.65E-01	2.21E-01	3.15E-01	3.33E-01	0.12	-2.77	-8.67
Σ_{tr2}	8.92E-01	1.07E+00	1.20E+00	8.92E-01	1.09E+00	1.23E+00	-0.02	1.78	2.16
ϕ_{i1}	7.05E-02	2.14E-02	3.10E-03	7.05E-02	1.92E-02	2.01E-03	-0.01	-10.18	-35.32
ϕ_{i2}	1.64E-02	2.15E-03	4.69E-04	1.63E-02	2.31E-03	1.00E-03	-0.35	7.57	113.56
$adf1$	0.74252			0.83068			11.87		
$adf2$	3.25042			2.14264			-34.08		

Ancora una volta, l'aumento di un fattore 2.5 della sezione d'urto efficace di scattering 1->2 è imputabile alla variazione (+ 44%) della frazione volumetrica di acqua nella cella II della zona 6 rispetto alla cella II della zona 1.

6.4.5 - Zona 7

La modellizzazione geometrica della zona 7 e la distribuzione dei materiali sono riportati nelle Fig. 6.84 e 6.85.

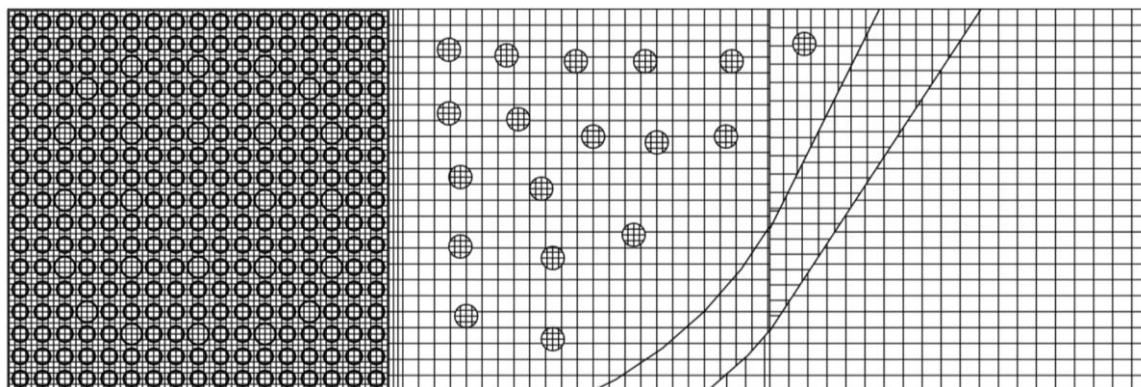


Figura 6.84: mesh computazionali riflettore EPR - zona 7

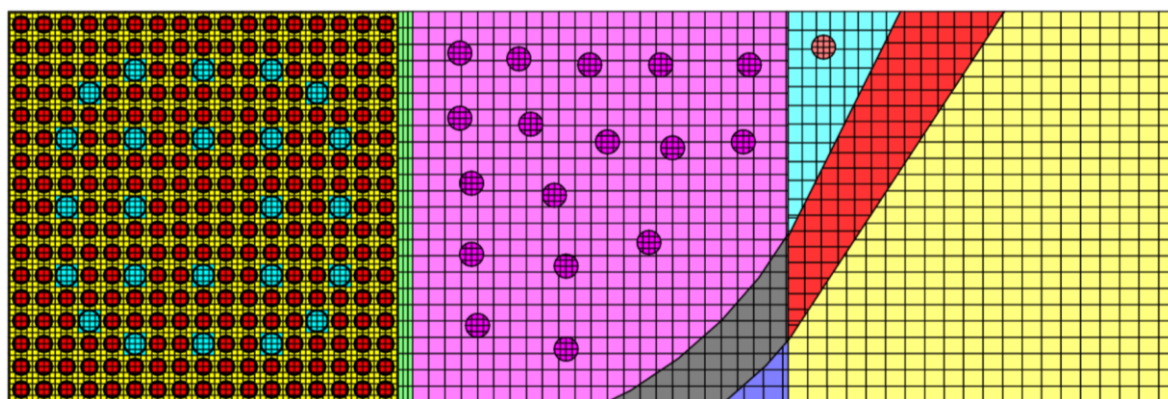


Figura 6.85: disposizione dei materiali riflettore EPR - zona 7

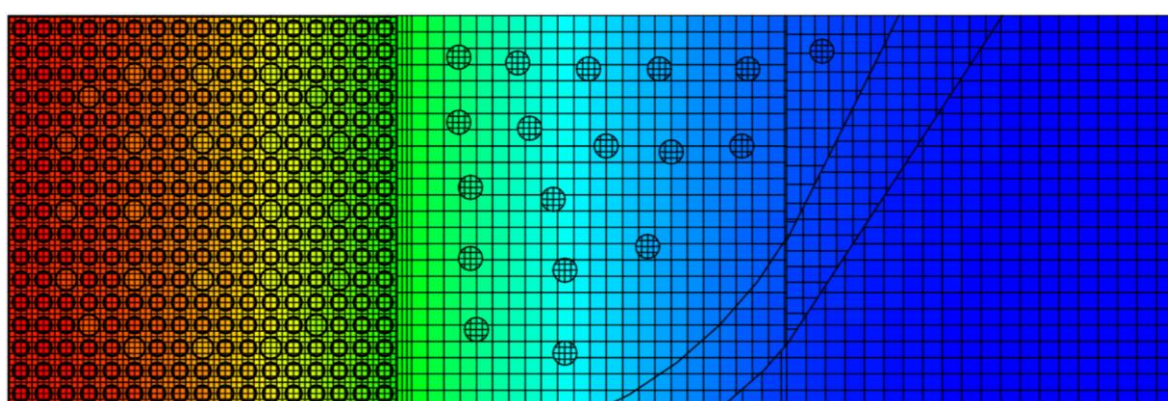


Figura 6.86: mappa di flusso veloce riflettore EPR - zona 7

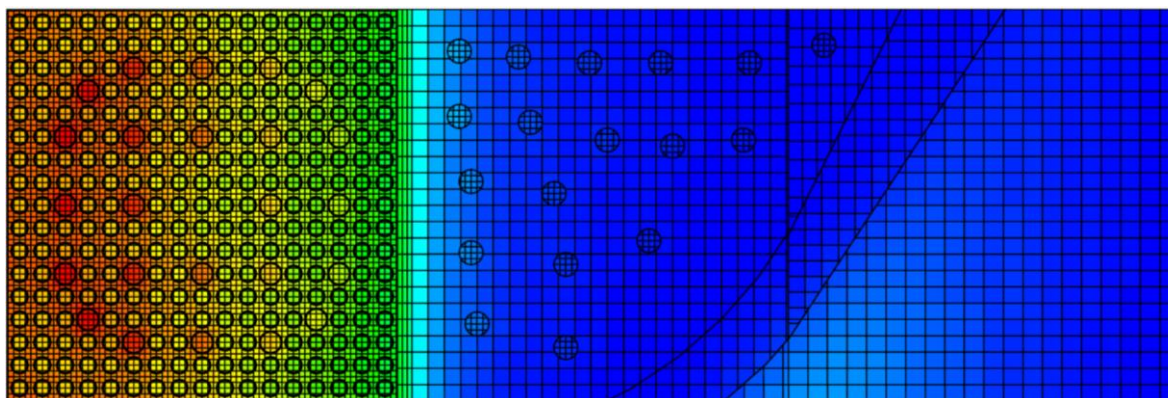
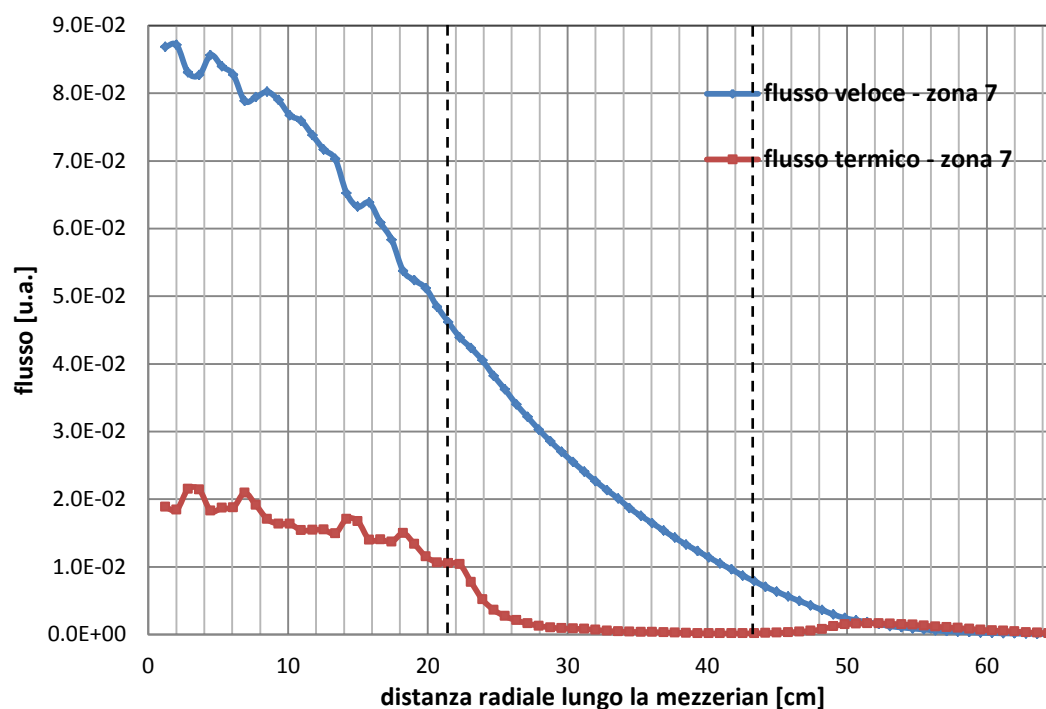
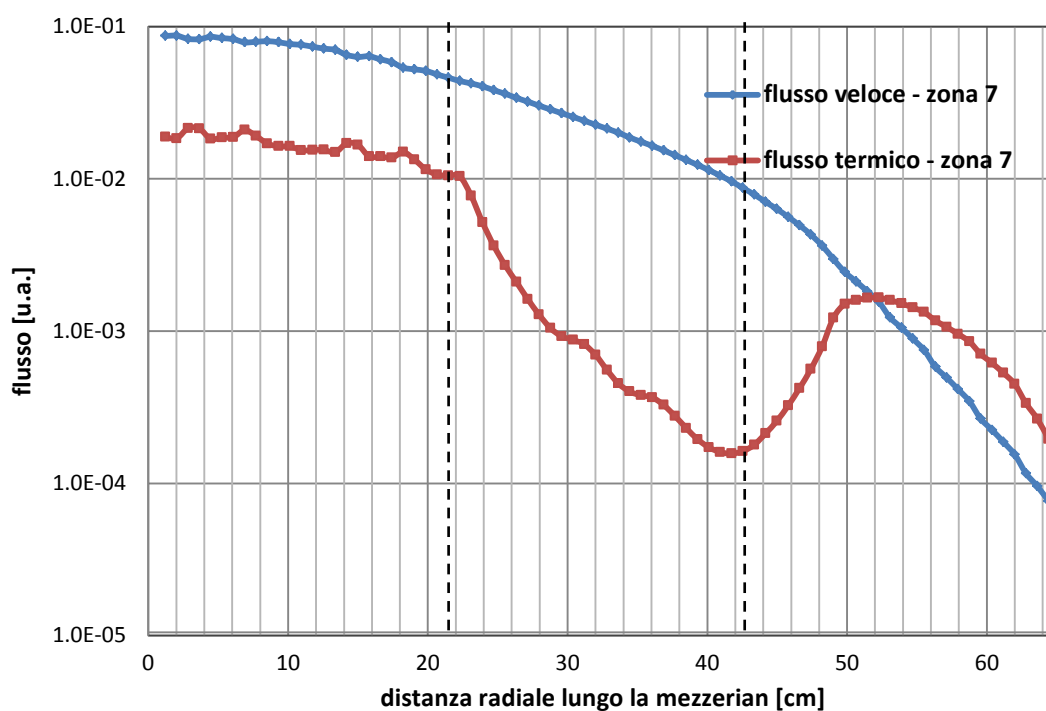


Figura 6.87: mappa di flusso termico riflettore EPR - zona 7

L'andamento del profilo di flusso veloce e termico in zona di mezzeria viene riportato nelle Fig. 6.88 e 6.89.

Figura 6.88: profilo di flusso termico e veloce riflettore EPR (*lin/lin*) - zona 7Figura 6.89: profilo di flusso termico e veloce riflettore EPR (*log/lin*) - zona 7

Il valore dei parametri di cella ottenuti per le due zone in cui è suddiviso il riflettore della zona 7 è riportato nella Tab. 6.23.

Tabella 6.23: parametri di cella - zona 7

	Zona 1			Zona 7			Var [%]		
	Assembly	cella I	cella II	Assembly	cella I	cella II	Assembly	cella I	cella II
K_{eff}	0.94394			0.94669			43		
Σ_{a1}	8.93E-03	3.52E-03	3.08E-03	8.96E-03	3.63E-03	2.96E-03	0.32	3.24	-3.80
Σ_{a2}	7.76E-02	7.41E-02	4.51E-02	7.74E-02	8.88E-02	4.10E-02	-0.26	19.82	-9.00
Σ_{f1}	2.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	2.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	-0.12	-	-
Σ_{f2}	4.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	4.15E-02	0.00E+00	0.00E+00	-0.35	-	-
Σ₁₋₂	1.82E-02	8.00E-03	7.75E-03	1.82E-02	4.86E-03	2.37E-02	0.10	-39.22	205.18
Σ₂₋₁	1.26E-03	3.12E-03	1.32E-03	1.29E-03	4.32E-03	8.78E-04	2.03	38.49	-33.49
Σ_{tot1}	5.47E-01	6.00E-01	6.05E-01	5.48E-01	5.83E-01	6.95E-01	0.26	-2.86	14.87
Σ_{tot2}	1.34E+00	1.45E+00	1.84E+00	1.34E+00	1.25E+00	1.90E+00	0.13	-13.97	3.03
vΣ_{f1}	5.51E-03	0.00E+00	0.00E+00	5.50E-03	0.00E+00	0.00E+00	-0.25	-	-
vΣ_{f2}	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.01	-	-
D₁	1.506	1.027	0.914	1.500	1.008	0.938	-0.41	-1.84	2.59
D₂	0.374	0.311	0.278	0.374	0.326	0.273	0.08	4.90	-1.77
Σ_{tr1}	2.21E-01	3.24E-01	3.65E-01	2.22E-01	3.31E-01	3.55E-01	0.57	2.06	-2.60
Σ_{tr2}	8.92E-01	1.07E+00	1.20E+00	8.91E-01	1.02E+00	1.22E+00	-0.16	-4.51	1.72
φ1	7.05E-02	2.14E-02	3.10E-03	7.18E-02	2.23E-02	1.80E-03	1.80	4.15	-41.92
φ2	1.64E-02	2.15E-03	4.69E-04	1.64E-02	1.45E-03	9.18E-04	0.05	-32.55	95.67
adf₁	0.74252			0.88212			18.80		
adf₂	3.25042			1.51119			-53.51		

6.5 Confronti SCALE 6.1.3 – SERPENT 2.0

Si è provveduto ad effettuare una verifica del valore dei parametri di cella di riflettore EPR ottenuti con SCALE 6.1.3 attraverso un confronto con i dati ottenibili da SERPENT 2.0. Per far ciò, dal momento che Serpent non permette l'assegnazione di condizioni al contorno miste di riflessione e vuoto sull'intero sistema assembly/riflettore, si è realizzato un calcolo di confronto tra SCALE 6.1.3 e SERPENTE 2.0, assegnando, per entrambi i codici, condizioni di sola riflessione sul dominio esterno del sistema ed utilizzando le caratteristiche geometriche e materiali del riflettore PWR TMI-I a cui è stato sostituito il riflettore standard con quello pesante. Le condizioni operative utilizzate sono di HZP (600K), la concentrazione di boro nel moderatore è stata posta uguale a zero. Il calcolo Monte Carlo è stato realizzato adottando una popolazione neutronica di 150000 particelle per 200 cicli saltando i primi 50.

La distribuzione geometrica del sistema assembly/riflettore per come visualizzata da SERPENT 2.0, viene riportata nella Fig. 6.90.

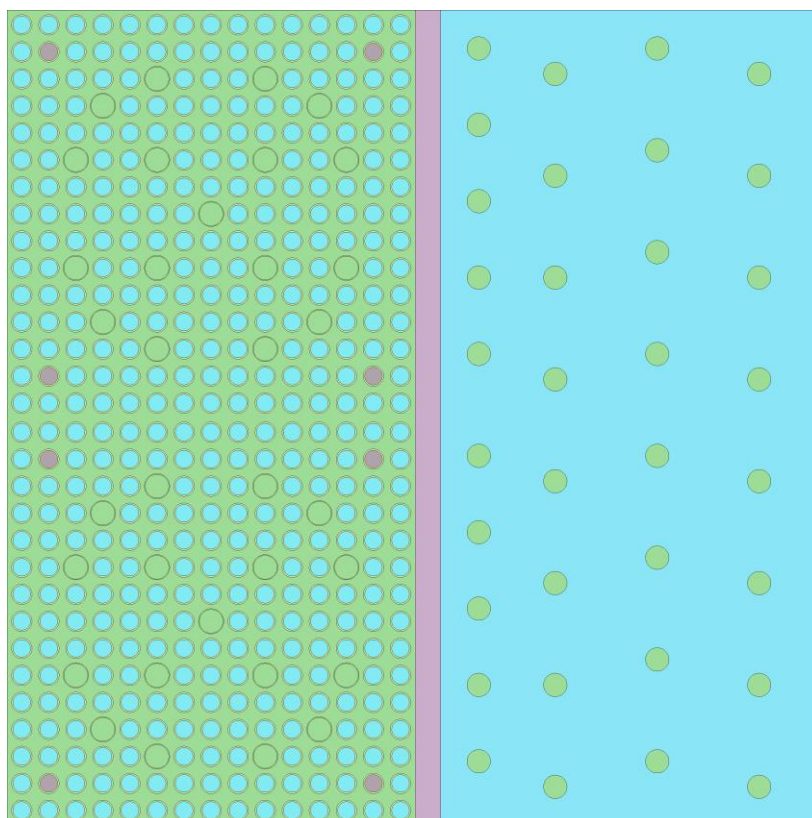


Figura 6.90: geometria e distribuzione dei materiali EPR - Serpent 2.0

La Fig. 6.91 riporta la mappa di flusso termico per come realizzata dal codice Monte Carlo.

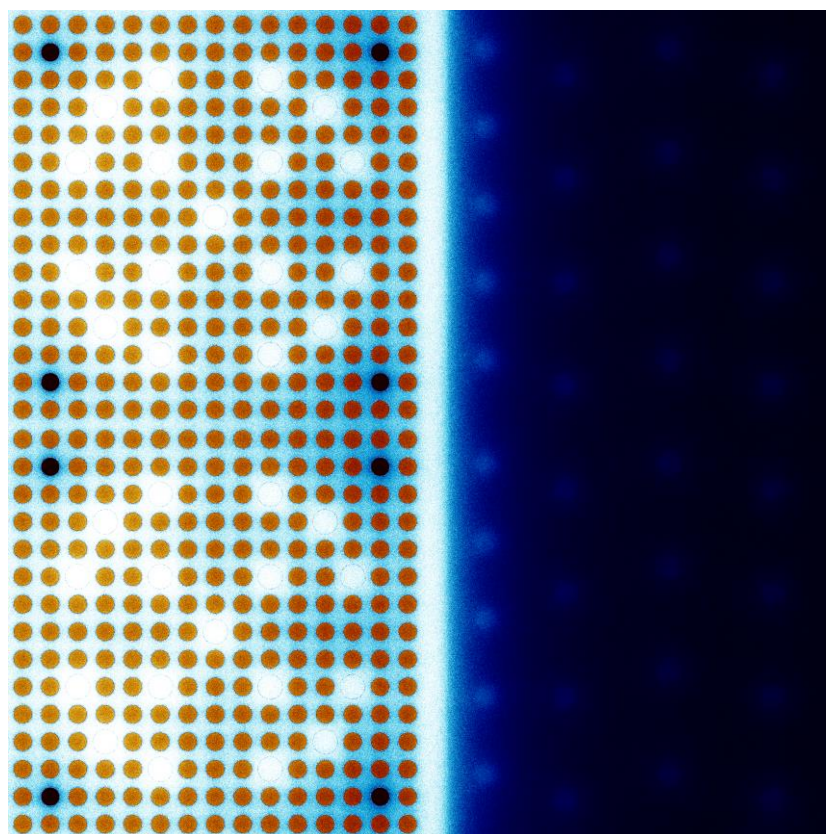


Figura 6.91: mappa di flusso termico sistema assembly/riflettore EPR - Serpent 2.0

I risultati ottenuti ed il confronto con quelli proposti da SCALE 6.1.3 sono riportati in Tab. 6.24.

Tabella 6.24: dati di cella SCALE 6.1.3 vs SERPENT 2.0

	SCALE 6.1.3		SERPENT 2.0				[%]	[%]
	Assembly	Riflettore	Assembly	var	Riflettore	var	var_ass	var_ref
Σ_{a1}	1.02E-02	3.43E-03	1.05E-02	0.00017	3.16E-03	0.00050	2.07	-7.96
Σ_{a2}	1.09E-01	7.46E-02	1.10E-01	0.00015	6.54E-02	0.00038	0.78	-12.44
Σ_{f1}	3.53E-03	0.00E+00	3.58E-03	1.80E-04	0.00E+00	-	1.42	-
Σ_{f2}	7.79E-02	0.00E+00	7.85E-02	1.60E-04	0.00E+00	-	0.68	-
$\Sigma_{1 \rightarrow 2}$	1.65E-02	5.12E-03	1.76E-02	0.00017	5.80E-03	0.00074	6.15	-5.14
$\Sigma_{2 \rightarrow 1}$	1.93E-03	5.23E-03	1.79E-03	0.00192	4.86E-03	0.00366	-7.45	10.84
Σ_{tot1}	5.54E-01	6.06E-01	5.67E-01	5.00E-05	5.82E-01	0.00020	2.24	-3.99
Σ_{tot2}	1.42E+00	1.44E+00	1.43E+00	7.00E-05	1.42E+00	0.00018	0.53	-0.98
$v\Sigma_{f1}$	8.94E-03	0.00E+00	9.04E-03	0.00019	0.00E+00	-	1.13	-
$v\Sigma_{f2}$	1.90E-01	0.00E+00	1.91E-01	0.00016	0.00E+00	-	0.68	-
ϕ_1	6.92E-02	2.73E-02	3.21E+01	0.00016	1.27E+01	0.00066	-	-
ϕ_2	1.03E-02	1.53E-03	5.13E+00	0.0002	8.98E-01	0.00074	-	-
ϕ_1/ϕ_2	6.7	17.9	6.3	-	14.1	-	-7.02	-21.06

La determinazione della variazione percentuale relativa è stata realizzata scegliendo come riferimento SCALE 6.1.3. I risultati ottenuti dai due codici sono in buon accordo che sarebbe ulteriormente migliorabile per le sezioni d'urto di scattering (aumentando la popolazione neutronica simulata) e per le sezioni d'urto d'assorbimento (indagando l'effetto dell'autoschermo dell'acciaio in SCALE 6.1.3).

6.6 - Color set

La metodica di determinazione delle costanti di cella di riflettore considerando una modellizzazione 1-D che del sistema all'interfaccia assembly/riflettore non permette di considerare gli effetti bidimensionali sul valore delle costanti di cella e sugli assembly discontinuity factor. Si è quindi voluto procedere ad una modellizzazione bidimensionale per le porzioni angolari della zona del riflettore dove gli effetti di settori di riflettore adiacenti su uno stesso assembly sono sicuramente più evidenti.

Attraverso il codice di riferimento si è realizzato un color-set 2x2 per la zona angolare di riflessione che contiene la "tie-rod" (zone 4 e 5). Si è ragionevolmente presunto che tale porzione angolare di riflessione sia quella più soggetta all'influenza degli effetti bidimensionali dovuti alla presenza di due delle zone di riflessione costitutivamente più dissimili.

Nelle Fig. 6.92 e 6.93 si riportano le mesh computazionali ed la distribuzione dei materiali per come modellizzati con SCALE 6.1.3.

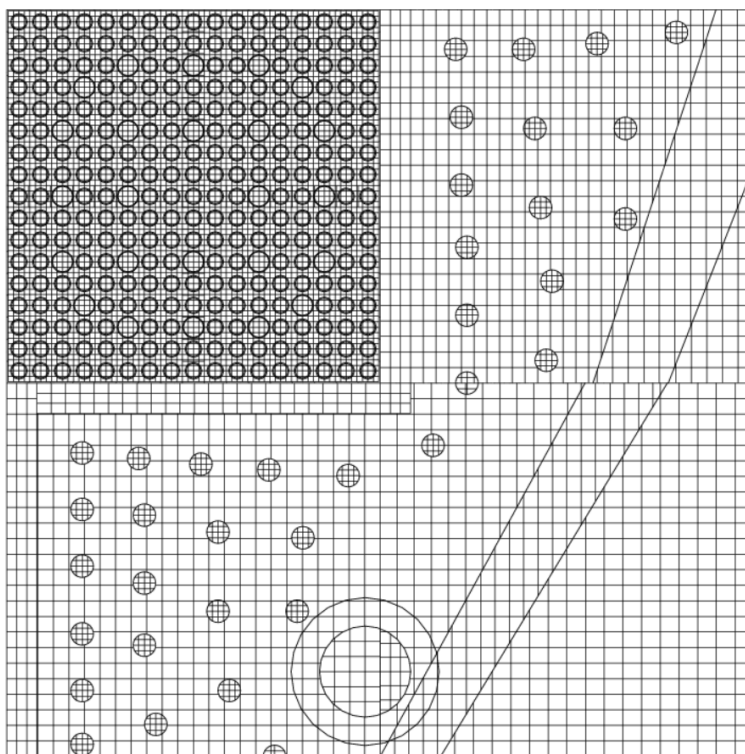


Figura 6.92: mesh computazionali - color set 2x2

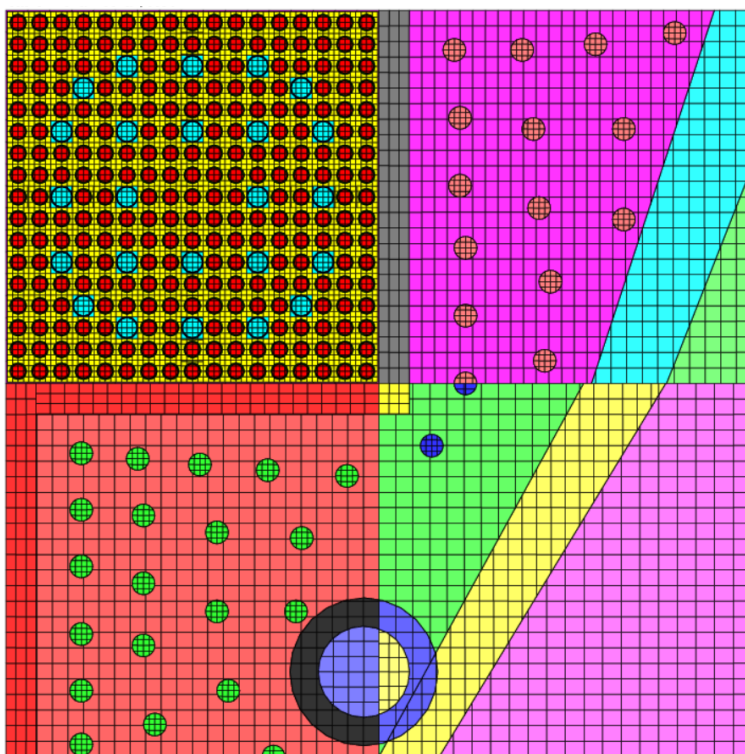


Figura 6.93: distribuzione dei materiali - color set 2x2

Le mappe di flusso termico e veloce realizzato dal codice di riferimento vengono riportate nelle Fig. 6.94 e 6.95.

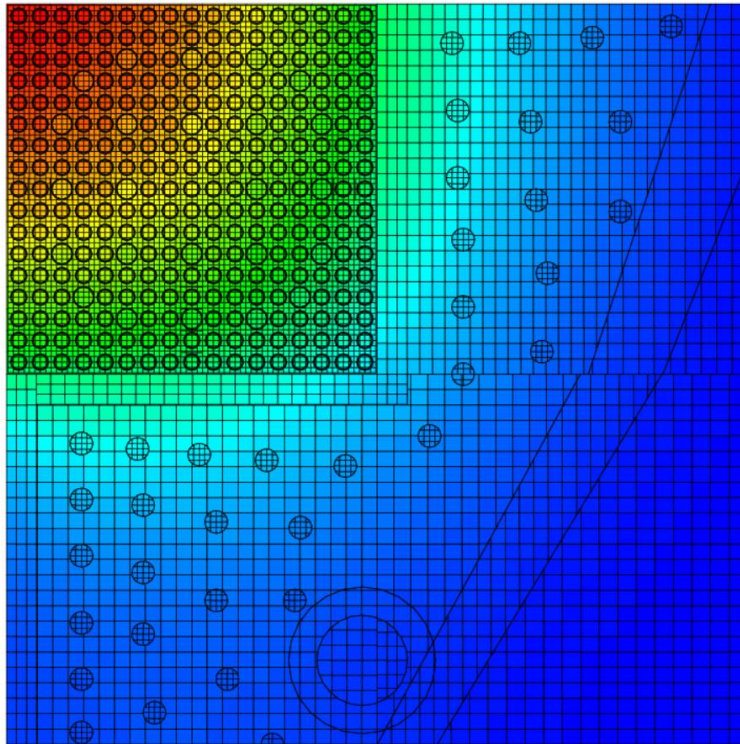


Figura 6.94: mappa di flusso veloce - color set 2x2

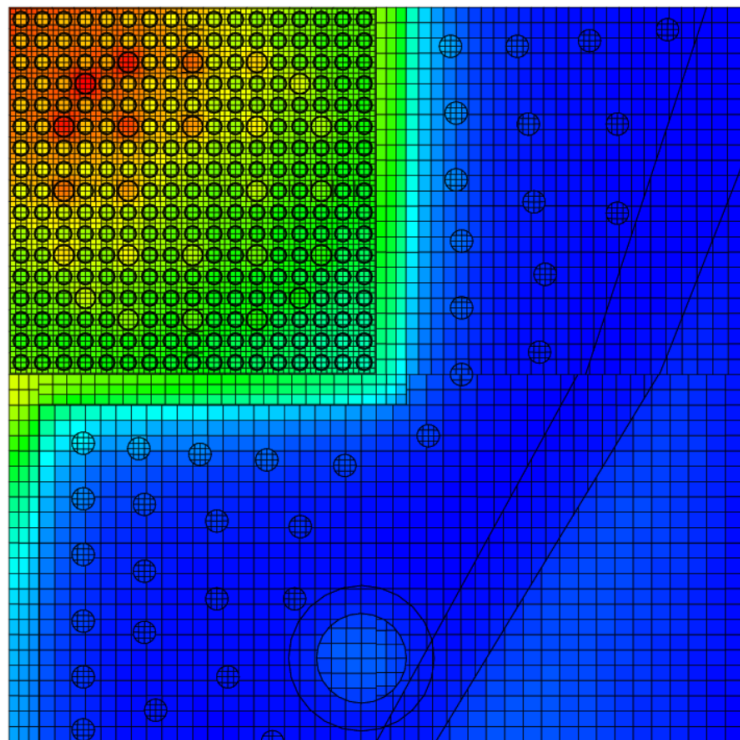


Figura 6.95: mappa di flusso veloce - color set 2x2

La valutazione quantitativa dell'effetto della modellizzazione ad angolo sul valore dei parametri di cella è stato realizzato confrontando i dati di cella della zona 4 (cella I) valutati in color set con i dati di cella della zona 4 (cella I) valutati con la configurazione monodimensionale discussa precedentemente.

Tabella 6.25: parametri di cella riflettore EPR - color set 2x2

	Zona 4 (1-D)		Zona 4 (2-D)		Var [%]	Var [%]
	Assembly	cella I	Assembly	cella I	Assembly	cella I
K_{eff}	0.94256		0.82081372		-12175 pcm	
Σ_{a1}	8.95E-03	3.38E-03	8.97E-03	3.43E-03	0.22	1.46
Σ_{a2}	7.76E-02	7.29E-02	7.77E-02	7.29E-02	0.14	-0.06
Σ_{f1}	2.14E-03	0.00E+00	2.14E-03	1.53E-02	0.07	-
Σ_{f2}	4.16E-02	0.00E+00	4.16E-02	1.80E-03	0.08	-
Σ_{1-2}	1.82E-02	8.98E-03	1.84E-02	9.39E-03	0.87	4.56
Σ_{2-1}	1.26E-03	2.89E-03	1.25E-03	2.83E-03	-1.07	-2.24
Σ_{tot1}	5.48E-01	5.93E-01	5.48E-01	5.97E-01	0.07	0.69
Σ_{tot2}	1.34E+00	1.47E+00	1.34E+00	1.47E+00	0.32	0.23
$\nu\Sigma_{f1}$	5.50E-03	0.00E+00	5.51E-03	0.00E+00	0.13	-
$\nu\Sigma_{f2}$	1.01E-01	0.00E+00	1.01E-01	0.00E+00	0.44	-
D_1	1.502	1.067	1.488	1.058	-0.93	-0.84
D_2	0.374	0.309	0.374	0.309	0.00	0.00
Σ_{tr1}	2.22E-01	3.12E-01	2.22E-01	3.13E-01	0.21	0.45
Σ_{tr2}	8.92E-01	1.08E+00	8.93E-01	1.08E+00	0.13	0.09
ϕ_1	7.04E-02	1.84E-02	6.18E-02	1.48E-02	-12.16	-19.73
ϕ_2	1.64E-02	2.08E-03	1.47E-02	1.77E-03	-10.10	-14.88

I risultati presentati in Tab. 6.25 mostrano come gli effetti bidimensionali, se si eccettua il valore trovato per la sezione d'urto di scattering 2-1, conducono ad una variazione dei parametri di cella al di sotto dell'1%. Tale circostanza viene confermata in letteratura dove l'adozione di dati di cella provenienti da calcoli di color-set al posto di dati di cella provenienti da calcoli 1-D assembly/riflettore produce un miglioramento nella stima del coefficiente di moltiplicazione effettiva di 1/8 di nocciolo di soli circa 20 pcm.

Appendice I

Richiami di teoria della diffusione per lo studio dei sistemi riflessi¹

La teoria della diffusione ad un gruppo

Si definisca un reattore a slab costituito da un nocciolo contenente una miscela omogenea di combustibile e moderatore circondato da un riflettore.

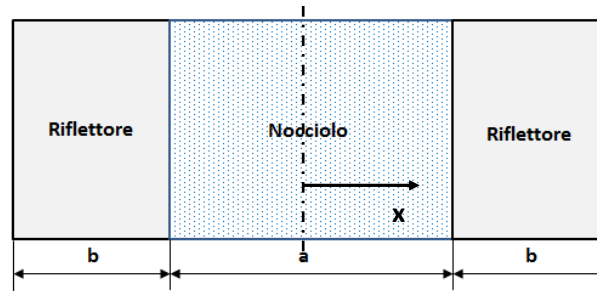


Figura I.1: reattore a slab con riflettore

la popolazione neutronica del nocciolo si distribuisce secondo la seguente formulazione nell'approssimazione mediante equazione di diffusione:

$$D_n \frac{d^2 \phi_{th,n}}{dx^2} + (k_\infty - 1) \Sigma_{a,n} \phi_{th,n} = 0 \quad (I.1)$$

L'equazione (I.2) può essere posta nella seguente forma:

$$D_n \frac{d^2 \phi_{th,n}}{dx^2} + B_n^2 \phi_{th,n} = 0 \quad (I.2)$$

dove B_n^2 , noto come buckling del nocciolo, risulta essere definito nel seguente modo:

$$B_n^2 = \frac{(k_\infty - 1)}{L_{th,n}^2} \quad (I.3)$$

con $L_{th,n}^2$ lunghezza di diffusione termica nel nocciolo. L'equazione (I.3), è riconducibile alla seguente formulazione:

$$\frac{k_\infty}{1 + B_n^2 L_{th,n}^2} = 1 \quad (I.4)$$

L'equazione di diffusione per la zona del riflettore, in virtù dell'assenza di materiale moltiplicante, assume una formulazione semplificata:

¹ J.R. Lamarsch "Introduction to Nuclear Reactor Theory", Addison-Wesley Publishing Company, Inc. - 1966

$$D_r \frac{d^2 \phi_{th,r}}{dx^2} - \frac{1}{L_{th,r}^2} \phi_{th,r} = 0 \quad (I.5)$$

con $\phi_{th,r}$ e $L_{th,r}^2$ rispettivamente il flusso termico e la lunghezza di diffusione termica nella zona di riflessione.

Soluzione dell'equazione di diffusione ad un gruppo

La soluzione generale dell'equazione (I.1), considerando che il sistema è simmetrico, è una funzione pari della forma:

$$\phi_{th,n} = A \cos B_n x \quad (I.6)$$

La soluzione generale dell'equazione (I.5) per valori positivi delle x , che è zero all'estremità estrapolata del riflettore ($\varphi = 0$ a $x = a/2 + b$), è:

$$\phi_{th,r} = A' \sinh \left(\frac{(a/2) + b - x}{L_{th,r}} \right) \quad (I.7)$$

Utilizzando la condizione al contorno di flusso continuo all'interfaccia nocciolo-riflettore ($|x| = a/2$ $\varphi_n = \varphi_r$), si ottiene la seguente relazione:

$$A \cos \frac{B_n a}{2} = A' \sinh \frac{b}{L_{th,r}} \quad (I.8)$$

Similmente, la continuità della corrente in $|x| = a/2$ fornisce:

$$D_n B_n A \sin \frac{B_n a}{2} = \frac{D_r}{L_{th,r}} A' \cosh \frac{b}{L_{th,r}} \quad (I.9)$$

Dividendo la (I.9) per la (I.8), le costanti A e A' si elidono e si ottiene la seguente espressione:

$$D_n B_n \tan \frac{B_n a}{2} = \frac{D_r}{L_{th,r}} A' \coth \frac{b}{L_{th,r}} \quad (I.10)$$

La soluzione grafica dell'equazione (I.10) si ottiene in modo più conveniente moltiplicando ambo i membri per $a/2$ e dividendo per D_n ; ciò fornisce:

$$\frac{B_c a}{2} \tan \frac{B_c a}{2} = \frac{D_r a}{2 D_n L_{th,r}} A' \coth \frac{b}{L_{th,r}} \quad (I.11)$$

I due membri dell'equazione (I.11) sono graficamente rappresentati nella Fig. I.2 in funzione di $B_c a/2$. Il lato destro dell'equazione (RHS) è indipendente da B_c e, una volta assegnato il valore ad a , si presenta come una linea orizzontale. Il lato sinistro (LHS) mostra l'andamento rappresentato in Fig. I.2 in cui i valori per $B_c a/2 < 0$ non hanno significato fisico.

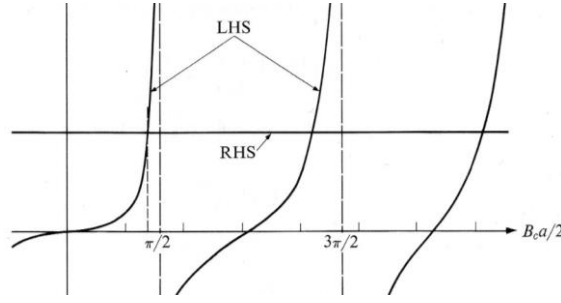


Figura I.2: lato sinistro (LHS) e lato destro (RHS) dell'equazione critica ad un gruppo - reattore riflesso a slab

Nel derivare la relazione (I. 11) sono state eliminate le costanti A ed A' e non è quindi possibile determinare il valore assoluto del flusso che, d'altra parte, dipende dalla potenza espressa dal sistema. E' comunque possibile esprimere A in termini di A' in modo da conoscere la forma del flusso sull'intero sistema:

$$A' = A \frac{\cos(B_c a/2)}{\sinh(b/L_{th})} \quad (I. 12)$$

ed il flusso risulta quindi essere:

$$\varphi_{th}(x) = A \begin{cases} \cos B_c x, & |x| \leq a/2 \\ \cos(B_c a/2) \sinh[(a/2 + b - |x|)/L_{th}], & |x| \geq a/2 \end{cases} \quad (I. 13)$$

La costante A può essere determinata in termini della potenza del reattore integrando $\varphi(x)$ sull'intera zona di produzione di potenza del reattore (il nocciolo). In termini matematici, se P è la potenza per unità di superficie del reattore, γ l'energia recuperabile per fissione, e $\bar{\Sigma}_{fc}$ la sezione d'urto termica di fissione media nel nocciolo, allora:

$$P = \gamma \bar{\Sigma}_{fc} \int_{-a/2}^{a/2} \varphi(x) dx = \gamma \bar{\Sigma}_{fc} A \int_{-a/2}^{a/2} \cos B_c x dx = \frac{2\gamma \bar{\Sigma}_{fc} A \sin(B_c a/2)}{B_c} \quad (I. 14)$$

Quindi A si ricava da:

$$A = \frac{PB_c}{2\gamma \bar{\Sigma}_{fc} A \sin(B_c a/2)} \quad (I. 15)$$

Il modello ad un gruppo è una semplificazione che non tiene in conto del reale spettro neutronico di un reattore ad acqua leggera, ma può essere utilizzato per stimare la dimensione critica dei reattori veloci. Infatti, in tali sistemi i neutroni rallentano solo sino ad un'energia di circa 100 KeV prima di indurre fissione. A queste energie, la fissione ed altre sezioni d'urto variano lentamente con l'energia ed è quindi possibile ottenere stime ragionevoli della massa critica o delle dimensioni del reattore utilizzando un solo gruppo energetico.

La teoria della diffusione a due gruppi

Si considerano i neutroni descrivibili mediante solo due gruppi energetici, veloce e termico. L'energia che separa i due gruppi è dell'ordine di $5kT$ con k costante di Boltzmann. I gruppi veloce e termico risultano quindi matematicamente definiti come l'integrale del flusso su tutto il range energetico dei rispettivi gruppi:

$$\phi_1 = \int_0^{\sim 5kT} \phi(r, E) dE; \quad \phi_2 = \int_{\sim 5kT}^{\infty} \phi(r, E) dE \quad (I.16)$$

Il coefficiente di diffusione termico è, invece, valutabile dalla relazione

$$D_2 = \Gamma(m + 2) D(E_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^m \quad (I.17)$$

dove m è il parametro relativo alla dipendenza energetica della sezione d'urto di scattering alle energie termiche, $D(E_0)$ è il coefficiente di diffusione a 0.0253 eV, T_0 è pari a 293,61 K, e T è la temperatura del neutrone. Similmente, la sezione d'urto media macroscopica d'assorbimento termica è definita come:

$$\Sigma_2 = \bar{\Sigma}_a = \frac{\sqrt{\pi}}{2} g_a(T) \Sigma_a(E_0) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/2} \quad (I.18)$$

dove $g_a(T)$ è il fattore non $1/v$ noto anche come "fattore di Westcott". Diversamente, il coefficiente di diffusione veloce D_1 , supponendo valida l'approssimazione di separabilità delle variabili energia posizione nel flusso, è definito da:

$$D_1 = \frac{\int_{\sim 5kT}^0 D(E) \phi(E) dE}{\int_{\sim 5kT}^0 \phi(E) dE} \quad (I.19)$$

Nella Tab. I.1 si riportano i valori delle costanti veloci per diversi moderatori:

Tabella I.1: Costanti di gruppo per diversi moderatori

Moderatore	D_1	Σ_1	τ_T
[—]	[cm]	[cm ⁻¹]	[cm ²]
H ₂ O	1.13	0.0419	~27
D ₂ O	1.29	0.00985	131
Be	0.562	0.00551	102
C	1.016	0.00276	368

in cui D_1 è il coefficiente di diffusione veloce, Σ_1 una sezione d'urto d'assorbimento veloce fittizia che tiene conto della sparizione dei neutroni dalla zona veloce a quella termica per collisioni elastiche ed anelastiche e τ_T è pari al rapporto D_1/Σ_1 .

Le equazioni di diffusione a due gruppi

In condizioni stazionarie, l'equazione di diffusione per i neutroni veloci nel nocciolo risulta:

$$D_{1n}\nabla^2\phi_{1n} - \Sigma_{1n}\phi_{1n} + \eta_T\epsilon\Sigma_{2Fn}\phi_{2n} = 0 \quad (I.20)$$

dalla definizione di fattore di moltiplicazione infinito, $\eta_T\epsilon\Sigma_{2Fn} = (k_\infty/p_n)\Sigma_{2n}$, dove Σ_{2n} è la sezione d'urto media d'assorbimento del gruppo lento della miscela fuel-moderatore e p_n è la probabilità di fuga dalle risonanze. L'equazione (I.20) può quindi essere riscritta come:

$$\boxed{D_{1n}\nabla^2\phi_{1n} - \Sigma_{1n}\phi_{1n} + (k_\infty/p_n)\Sigma_{2Fn}\phi_{2n} = 0} \quad (I.21)$$

l'equazione di diffusione per la regione dei neutroni veloci risulta essere:

$$\boxed{D_{2n}\nabla^2\phi_{2n} - \Sigma_{2n}\phi_{2n} + p_n\Sigma_{1n}\phi_{1n} = 0} \quad (I.22)$$

l'equazione di diffusione del gruppo veloce per la zona del riflettore è, in assenza di materiale moltiplicante, pari alla seguente formulazione:

$$\boxed{D_{1r}\nabla^2\phi_{1r} - \Sigma_{1r}\phi_{1r} = 0} \quad (I.23)$$

l'equazione del flusso termico assume la seguente formulazione:

$$\boxed{D_{2r}\nabla^2\phi_{2r} - \Sigma_{2r}\phi_{2r} + \Sigma_{1r}\phi_{1r} = 0} \quad (I.24)$$

Le quattro equazioni appena elencate rappresentano le equazioni di diffusione a due gruppi per la zona del nocciolo e per quella del riflettore.

Risoluzione dell'equazione a due gruppi per sistemi totalmente riflessi

Le equazioni di diffusione del nocciolo (I.21) e (I.22) possono essere disaccoppiate risolvendo preliminarmente la (I.20) in funzione di ϕ_{2n} :

$$\phi_{2n} = \frac{p_n}{k_\infty\Sigma_{2n}} (-D_{1n}\nabla^2\phi_{1n} + \Sigma_{1n}\phi_{1n}) \quad (I.25)$$

sostituendo questa espressione nella (I.21) si ottiene un'equazione differenziale del quarto ordine in funzione del solo ϕ_{1n} .

$$\tau_n L_n^2 \nabla^2 \nabla^2 \phi_{1n} - (\tau_n + L_n^2) \nabla^2 \phi_{1n} - (k_\infty - 1) \phi_{1n} = 0 \quad (I.26)$$

con

$$\tau_n = D_{1n}/\Sigma_{1n} \quad e \quad L_n^2 = D_{2n}/\Sigma_{2n}$$

L'equazione differenziale del quarto ordine (I.26) può essere risolta fattorizzandola per porla nella forma seguente:

$$(\nabla^2 + \mu^2)(\nabla^2 - \lambda^2)\phi_{1n} = 0 \quad (I.27)$$

dove μ^2 e λ^2 devono soddisfare le relazioni:

$$\mu^2 \lambda^2 = \frac{k_\infty - 1}{\tau_n L_n^2} \quad (I.28)$$

$$\lambda^2 - \mu^2 = \frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{L_n^2} \quad (I.29)$$

Si ottiene quindi un'espressione quadratica per μ e per λ :

$$\mu^2 = \frac{1}{2\tau_n L_n^2} \left[-(\tau_n + L_n^2) + \sqrt{(\tau_n + L_n^2)^2 + 4(k_\infty - 1)\tau_n L_n^2} \right] \quad (I.30)$$

$$\lambda^2 = \frac{1}{2\tau_n L_n^2} \left[(\tau_n + L_n^2) + \sqrt{(\tau_n + L_n^2)^2 + 4(k_\infty - 1)\tau_n L_n^2} \right] \quad (I.31)$$

Poiché per un reattore critico k_∞ deve essere maggiore dell'unità, sia μ^2 che λ^2 sono positivi e quindi μ e λ sono reali. L'equazione (I.27) è equivalente alle seguenti due equazioni:

$$(\nabla^2 + \mu^2)X = 0 \quad (I.32)$$

$$(\nabla^2 - \lambda^2)Y = 0 \quad (I.33)$$

e la soluzione generale per ϕ_{1n} è quindi la somma delle soluzioni per X e per Y . Poiché le equazioni (I.32) e (I.33) sono entrambe del secondo ordine ognuna delle due soluzioni per X e per Y consiste di due funzioni indipendenti, ma, a causa della simmetria, solo una soluzione per ciascuna delle equazioni può essere utilizzata ordinariamente, e la soluzione generale per ϕ_{1n} risulta semplicemente essere pari a:

$$\phi_{1n} = AX + CY \quad (I.34)$$

dove devono essere determinate solo le due costanti A e C . Nella Tab. I.2 si riportano i valori delle funzioni X ed Y per una serie di geometrie semplici:

Tabella I.2: Funzioni di nocciolo a due gruppi per diverse geometrie

Geometria	X	Y
$[-]$	$[-]$	$[-]$
Slab infinito	$\cos \mu x$	$\cosh \lambda x$
Cilindro infinito	$J_0(\mu r)$	$I_0(\lambda r)$
Sfera	$\sin \mu r / r$	$\sinh \lambda r / r$

Il flusso termico può essere determinato assumendo una soluzione della forma:

$$\phi_{2n} = A'X + C'Y \quad (I.35)$$

Sostituendo la (I.34) e la (I.35) nell'equazione (I.22), si ottiene la seguente espressione:

$$-(D_{2n}\mu^2 + \Sigma_{2n})A'X + p_n\Sigma_{1n}AX + (D_{2n}\lambda^2 - \Sigma_{2n})C'Y + p_n\Sigma_{1n}CY = 0 \quad (I.36)$$

Poiché X ed Y sono funzioni indipendenti, l'equazione (I.36) non sarà soddisfatta a meno che le costanti moltiplicative di X ed Y non siano identicamente nulle. Quest'ultima condizione determina una relazione tra A ed A' e C e C':

$$\frac{A'}{A} = \frac{p_n \Sigma_{1n}/\Sigma_{2n}}{1 + \mu^2 L_n^2}; \quad \frac{C'}{C} = \frac{p_n \Sigma_{1n}/\Sigma_{2n}}{1 - \lambda^2 L_n^2} \quad (I.37)$$

Il flusso termico può allora essere scritto come:

$$\phi_{2n} = AS_1X + CS_2Y \quad (I.38)$$

dove $S_1 = A'/A$ ed $S_2 = C'/C$. Le quantità S_1 ed S_2 sono frequentemente note come *coefficienti d'accoppiamento* per i flussi veloci e termici.

Calcolo della forma del flusso nella zona del riflettore

Le equazioni di diffusione nella zona del riflettore, possono essere riscritte come:

$$\nabla^2 \phi_{1r} - k_{1r}^2 \phi_{1r} = 0 \quad (I.39)$$

$$\nabla^2 \phi_{2r} - k_{2r}^2 \phi_{2r} + \frac{\Sigma_{1r}}{D_{2r}} \phi_{1r} = 0 \quad (I.40)$$

dove

$$k_{1r}^2 = \frac{1}{\tau_r}; \quad k_{2r}^2 = \frac{1}{L_r^2} \quad (I.41)$$

La soluzione dell'equazione (I.39) può essere sempre espressa in termini di una sola funzione ed una costante incognita. Ad esempio, si verifica che, per un reattore a slab con un nocciolo di spessore a ed un riflettore di spessore b , il flusso veloce è esprimibile analiticamente come:

$$\phi_{1r} = F \sinh k_{1r} \left(\frac{a}{2} + b - |x| \right) \quad (I.42)$$

dove F è una costante. La funzione precedente soddisfa la (I.39) ed è zero alla lunghezza estrapolata $|x| = a/2 + b$. La soluzione generale della (I.39), può essere posta nella forma:

$$\phi_{1r} = FZ_1 \quad (I.43)$$

In ultimo, il flusso termico nel riflettore è determinabile assumendo una soluzione dell'equazione (I.40) della forma:

$$\phi_{2r} = S_3 \phi_{1r} + G Z_2 \quad (I.44)$$

dove S_3 è un'altra costante di accoppiamento, G è una costante, e Z_2 è una soluzione dell'equazione

$$\nabla^2 Z_2 - k_{2r}^2 Z_2 = 0 \quad (I.45)$$

che diventa zero se estrapolata alla superficie del riflettore. Se si sostituisce la (I.44) nella (I.45) si verifica che l'equazione differenziale risulta soddisfatta a condizione che S_3 assuma il valore:

$$S_3 = \frac{\Sigma_{1r}/D_{2r}}{k_{2r}^2 - k_{1r}^2} = \frac{D_{1r}/\Sigma_{2r}}{\tau_r - L_r^2} \quad (I.46)$$

Per il reattore a slab riflesso il flusso termico nel riflettore assumerà allora la forma:

$$\phi_{2r} = F S_3 \sinh k_{1r} \left(\frac{a}{2} + b - |x| \right) + G \sinh k_{1r} \left(\frac{a}{2} + b - |x| \right) \quad (I.47)$$

La Tab. I.3 riporta un elenco delle funzioni Z per le altre geometrie.

Tabella I.3: Funzioni di riflettore a due gruppi per diverse geometrie

Geometria	Z (b)	Z ($b \rightarrow \infty$)
$[-]$	$[-]$	$[-]$
Slab	$\sinh k \left(\frac{a}{2} + b - x \right)$	$e^{-k x }$
Cilindro	$I_0(kr)K_0[k(R+b) - I_0k(R+b)]K_0(kr)$	$K_0(kr)$
Sfera	$\frac{\sinh k(R+b-r)}{r}$	$\frac{e^{-kr}}{r}$

Il determinante critico

All'interfaccia nocciolo-riflettore, devono essere soddisfatte le seguenti condizioni sul flusso e sulla derivata del flusso (indicata con un apice) che esprimono la condizione fisica di continuità della corrente e del flusso.

$$\phi_{1n} = \phi_{1r} \quad (I.48)$$

$$D_{1n} \phi'_{1n} = D_{1r} \phi'_{1r} \quad (I.49)$$

$$\phi_{2n} = \phi_{2r} \quad (I.50)$$

$$D_{2n} \phi'_{2n} = D_{2r} \phi'_{2r} \quad (I.51)$$

Inserendo la soluzione analitica del flusso trovata nelle equazioni precedenti, si trova:

$$AX + CY - FZ_1 = 0 \quad (I.52)$$

$$AD_{1n}X' + CD_{1n}Y' - FD_{1r}Z'_1 = 0 \quad (I.53)$$

$$AS_1X + CS_2Y - FS_3Z_1 - GZ_2 = 0 \quad (I.54)$$

$$AD_{2n}S_1X' + CD_{2n}S_2Y' - FD_{2r}S_3Z'_1 - GD_{2r}Z'_2 = 0 \quad (I.55)$$

Un siffatto sistema possiede la soluzione unica $A = C = F = G = 0$ a meno che il determinante dei coefficienti moltiplicativi delle incognite sia zero. Quindi, affinché il flusso nel reattore non sia nullo è necessario che sia:

$$\begin{vmatrix} X & Y & -Z_1 & 0 \\ D_{1n}X' & D_{1n}Y' & -D_{1r}Z'_1 & 0 \\ S_1X & S_2Y & -S_3Z_1 & -Z_2 \\ D_{2n}S_1X' & D_{2n}S_2Y' & -D_{2r}S_3 & -D_{2r}Z'_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (I.56)$$

il primo membro della (I.56) è noto come il *determinante critico* a due gruppi. La criticità può essere ottenuta agendo o sulle caratteristiche fisiche (D_{ij}, S_1, S_2, S_3) o sulle dimensioni (X, Y, X', Y') del reattore in modo tale da annullare il determinante critico.

Calcoli di criticità

La valutazione della criticità utilizzando il determinante critico, può essere semplificata trasformando la (I.56) nella forma seguente:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ D_{1n} \frac{X'}{X} & D_{1n} \frac{Y'}{Y} & D_{1r} \frac{Z'_1}{Z_1} & 0 \\ S_1 & S_2 & S_3 & 1 \\ D_{2n} S_1 \frac{X'}{X} & D_{2n} S_2 \frac{Y'}{Y} & D_{2r} S_3 \frac{Z'_1}{Z_1} & D_{2r} \frac{Z'_2}{Z_2} \end{vmatrix} = 0 \quad (I.57)$$

Espandendo il determinante si ottiene la seguente espressione:

$$\begin{aligned} \frac{X'}{X} = & \left[D_{1n} D_{2r} (S_3 - S_1) \frac{Y'}{Y} \frac{Z'_2}{Z_2} + (D_{1r} D_{2n} S_2 - D_{1n} D_{2r} S_3) \frac{Y'}{Y} \frac{Z'_1}{Z_1} + D_{1r} D_{2r} (S_1 - S_2) \frac{Z'_1}{Z_1} \frac{Z'_2}{Z_2} \right] \div \\ & \div \left[D_{1n} D_{2n} (S_2 - S_1) \frac{Y'}{Y} + (D_{1r} D_{2n} S_1 - D_{1n} D_{2r} S_3) \frac{Z'_1}{Z_1} + D_{1n} D_{2r} (S_3 - S_2) \frac{Z'_2}{Z_2} \right] \end{aligned} \quad (I.58)$$

La composizione o dimensione richiesta per la criticità può essere facilmente ottenuta per via grafica, ossia plottando i due membri della (I.58) e trovando i punti d'intersezione delle due curve. Le funzioni X'/X , Y'/Y , e Z'/Z sono elencate nella Tab. I.4.

Tabella I.1: Funzioni per il determinante critico

Geometria	X/X'	Y/Y'
	[-]	[-]
Slab infinito	$-\mu \tan \frac{\mu a}{2}$	$\lambda \tanh \frac{\lambda a}{2}$
Cilindro infinito	$-\mu \frac{J_1(\mu R)}{J_0(\mu R)}$	$\lambda \frac{I_1(\lambda r)}{I_0(\lambda r)}$
Sfera	$-\mu \left(\frac{1}{\mu r} - \cot \mu R \right)$	$\lambda \left(\coth \lambda R - \frac{1}{\lambda R} \right)$
	$Z'/Z (b)$	$Z'/Z (b \rightarrow \infty)$
	[-]	[-]
Slab infinito	$-k \coth kb$	$-k$
Cilindro infinito	$k \frac{I_1(kR)K_0[k(R+b)] + I_0[k(R+b)]K_1(kR)}{I_0(kR)K_0[k(R+b)] - I_0[k(R+b)]K_0(kR)}$	$-k \frac{K_1(kR)}{K_0(kR)}$
Sfera	$-k \left(\frac{1}{kR} + \coth kb \right)$	$-k \left(\frac{1}{kR} + 1 \right)$

Calcolo dei flussi

Si riscrivono le equazioni (1.52-55) in termini di A in forma non omogenea:

$$CY - FZ_1 = -AX \quad (I.59)$$

$$CD_{1n}Y' - FD_{1r}Z'_1 = -AD_{1n}X' \quad (I.60)$$

$$CS_2Y - FS_3Z_1 - GZ_2 = -AS_1X \quad (I.61)$$

Quindi, utilizzando la regola di Cramer, si trova che:

$$C = \frac{AX}{\beta Y} \left(D_{1n} \frac{X'}{X} - D_{1r} \frac{Z'_1}{Z_1} \right) \quad (I.62)$$

$$F = \frac{AX}{\beta Z_1} \left(D_{1n} \frac{X'}{X} - D_{1n} \frac{Y'}{Y} \right) \quad (I.63)$$

$$G = \frac{AX}{\beta Z_2} \left[D_{1n}(S_2 - S_3) \frac{X'}{X} + D_{1n}(S_3 - S_1) \frac{Y'}{Y} + D_{1r}(S_1 - S_2) \frac{Z'_1}{Z_1} \right] \quad (I.64)$$

dove β è una costante definita come:

$$\beta = D_{1r} \frac{Z'_1}{Z_1} - D_{1n} \frac{Y'}{Y} \quad (I.65)$$

La valutazione della costante A può essere ottenuta a partire dalla conoscenza della potenza generata dal nocciolo:

$$P = \gamma \Sigma_{2fn} \int \phi_{2n}(r) dV \quad (I.66)$$

in cui Σ_{2fn} è la sezione d'urto di fissione termica e l'integrazione è condotta sull'intero nocciolo. Se si considera, ad esempio, lo slab infinito, il profilo di flusso è dato dalla relazione seguente:

$$\phi_{2n} = A \left[\cos \mu x + \left(\frac{C}{A} \right) \cosh \lambda x \right] \quad (I.67)$$

Dove (C/A) è data dalla (1.62) e, quindi, l'equazione (1.66) fornisce l'espressione esplicita per il calcolo di A:

$$A = \frac{P}{2\gamma \Sigma_{2fn} \left[\frac{1}{\mu} \sin \frac{\mu a}{2} + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{C}{A} \right) \sinh \frac{\lambda a}{2} \right]} \quad (I.68)$$

Reattori parzialmente riflessi

Nei sistemi parzialmente riflessi il flusso è funzione di due variabili. La soluzione dell'equazioni di diffusione a due gruppi può essere analiticamente ottenuta per sistemi parzialmente riflessi quali parallelepipedi con il riflettore posto solo su due facce opposte o cilindri finiti in cui il riflettore viene posto solo sulla superficie laterale o solo sulle due superfici di base. La Fig. I.5 illustra le circostanze geometriche descritte.

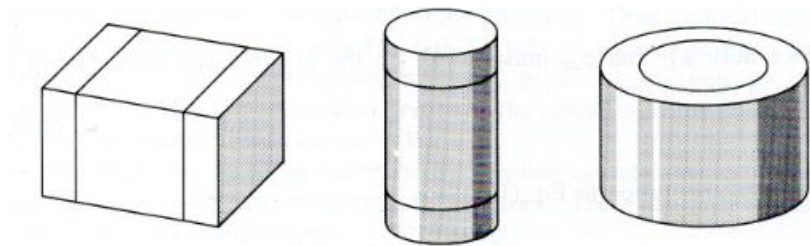


Figura I.3: sistemi parzialmente riflessi

Si consideri un reattore cilindrico finito del tipo di Fig. I.3; il raggio del nocciolo sia R e l'altezza estrapolata sia H, il centro delle coordinate corrisponda al centro del reattore. Le

equazioni a due gruppi nel nocciolo sono identiche a quelle già definite in sistemi infiniti (I.21) e (I.22). Il metodo di disaccoppiamento delle equazioni è lo stesso. Il flusso veloce e lento nel nocciolo può quindi essere scritto come:

$$\phi_{1n} = AX + CY \quad (I.69)$$

$$\phi_{2n} = AS_1X + CS_2Y \quad (I.70)$$

I cui termini sono identici a quelli visti precedentemente a parte la circostanza che X ed Y sono funzioni di due variabili r e z. Inserendo i laplaciani in coordinate cilindriche si ha:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} + \mu^2 X = 0 \quad (I.71)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial Y}{\partial r} + \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} - \lambda^2 Y = 0 \quad (I.72)$$

In cui i parametri μ e λ sono pari a (I.30) e (I.31). Le equazioni (I.71) e (I.72) possono essere risolte col metodo delle separazioni delle variabili. Quindi ponendo $X(r, z) = f(r)g(z)$ e sostituendo nell'equazione (I.71), si ottiene:

$$\frac{d^2 g}{dz^2} + \alpha_1^2 g = 0 \quad (I.73)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{df}{dr} + \alpha_2^2 f = 0 \quad (I.74)$$

Dove α_1 e α_2 sono le costanti di separazione correlate tra loro come:

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 = \mu^2 \quad (I.75)$$

La soluzione della (I.73) che è simmetrica nel piano di mezzeria del cilindro è:

$$g = \cos \alpha_1 z \quad (I.76)$$

e, poiché sia ϕ_{1n} che ϕ_{2n} devono annullarsi alla fine della lunghezza estrapolata, è evidente che:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{H} \quad (I.77)$$

La soluzione non singolare dell'equazione (I.75) è:

$$f = J_0(\alpha_2 r) \quad (I.78)$$

e quindi si trova che:

$$X(r, z) = J_0(\alpha_2 r) \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \quad (I.79)$$

Con procedimento analogo, si scopre che la seconda funzione di flusso Y è pari a:

$$Y(r, z) = I_0(\alpha_3 r) \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \quad (I.80)$$

dove

$$\alpha_3^2 = \lambda^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \quad (I.81)$$

Se si considera il flusso nel riflettore, la soluzione è ancora nella forma data dalle equazioni (I.32) e (I.33). Utilizzando la stessa procedura utilizzata per i flussi nel nocciolo, si trova che le funzioni Z_1 e Z_2 sono pari a:

$$Z_1 = K_0(\beta_1 r) \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \quad (I.82)$$

$$Z_2 = K_0(\beta_2 r) \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \quad (I.83)$$

dove β_1 e β_2 sono definiti come:

$$\beta_1^2 = k_{1r}^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \quad (I.84)$$

$$\beta_2^2 = k_{2r}^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \quad (I.85)$$

I parametri k_{1r}^2 e k_{2r}^2 sono dati dall'equazione (I.34). Le condizioni al contorno all'interfaccia nocciolo-riflettore, la continuità dei flussi e delle correnti, conduce ancora ad un set di quattro equazioni algebriche della stessa forma delle (I.52-55) in cui, però, la funzione $\cos(\pi z/H)$ compare in ogni termine e può essere allora cancellata da tutte le equazioni. L'equazione critica che si ottiene è identica alla (I.57) eccetto per il fatto che μ , λ , k_1 , k_2 sono sostituiti da α_2 , α_3 , β_1 e β_2 . La procedura per gestire il cilindro parzialmente riflesso può essere estesa senza difficoltà ad altri reattori parzialmente riflessi.

Reattori non omogenei

I sistemi non omogenei necessitano, per la loro risoluzione, di una procedura numerica. Si consideri, ad esempio, un reattore a slab infinito con un nocciolo non uniforme ma un riflettore uniforme, i coefficienti di diffusione possono essere funzione della posizione nel nocciolo. Le equazioni a due gruppi assumono allora la seguente formulazione:

$$\frac{d}{dx} \left(D_{1n} \frac{d\phi_{1n}}{dx} \right) - \Sigma_{1n} \phi_{1n} + \eta_T \Sigma_{2Fn} \phi_{2n} = 0 \quad (I.86)$$

$$\frac{d}{dx} \left(D_{2n} \frac{d\phi_{2n}}{dx} \right) - \Sigma_{2n} \phi_{2n} + \Sigma_{1n} \phi_{1n} = 0 \quad (I.87)$$

mentre, essendo il riflettore uniforme, le equazioni di diffusione assumeranno l'usuale formulazione:

$$D_{1r} \frac{d^2 \phi_{1r}}{dx^2} - \Sigma_{1r} \phi_{1r} = 0 \quad (I. 88)$$

$$D_{2r} \frac{d^2 \phi_{2r}}{dx^2} - \Sigma_{2r} \phi_{2r} + \Sigma_{1r} \phi_{1r} = 0 \quad (I. 89)$$

Per avviare una procedura numerica, è necessario fare una stima iniziale della composizione o della dimensione del reattore. Se, ad esempio, viene fornita la composizione del sistema, un'ipotesi di valore di tentativo può essere fatta sulla dimensione critica. Successivamente si assegna un valore arbitrario ad uno dei flussi sull'intero reattore. Per esempio, si ipotizza ϕ_2 costante nel nocciolo e zero nel riflettore. Introducendo tale assunzione (denotata con $\phi_2^{(0)}$) l'equazione (I.86) può essere riscritta come:

$$\frac{d}{dx} \left(D_{1n} \frac{d\phi_{1n}}{dx} \right) - \Sigma_{1n} \phi_{1n} = -\eta_T \Sigma_{2Fn} \phi_{2n}^{(0)} \quad (I. 90)$$

che è una funzione semplice non omogenea in ϕ_{1n} , ma poiché D_{1n} , Σ_{1n} , Σ_{2Fn} possono essere funzioni della posizione, deve essere risolta per integrazione numerica. Una prima stima del flusso veloce (denotato con $\phi_1^{(1)}$) può essere ottenuta imponendo la continuità del flusso all'interfaccia nocciolo-riflettore. Successivamente la $\phi_1^{(1)}$ viene inserita nelle (I.87) e (I.89) per ottenere una nuova stima del flusso termico (denotata con $\phi_2^{(1)}$). Quest'ultima, a sua volta, viene inserita nella (I.86) e (I.88) per dare una nuova stima (denominata $\phi_1^{(1)}$) del flusso veloce. All'aumentare delle iterazioni si osserva che, sebbene la grandezza dei diversi flussi vari ad ogni iterazione, il rapporto del flusso veloce e termico nelle iterazioni successive (ad es. $C_n = \phi_2^{(n+1)} / \phi_2^{(n)}$) si avvicina rapidamente ad una costante, indipendente dalla posizione. Fisicamente ciò è in accordo col fatto che, all'avanzare delle iterazioni, il flusso si avvicina all'autovalore fondamentale e le armoniche superiori tendono a scomparire. Ciò che rimane è un aumento o diminuzione o stazionarietà nel tempo (delle iterazioni) dell'intero flusso a seconda che il sistema sia sovracritico, sottocritico o critico. Dal punto di vista del calcolo se, dopo diverse iterazioni, C_n diventa più grande dell'unità, ciò significa che la dimensione del reattore supposta inizialmente ha portato ad un sistema sovracritico; il raggio del nocciolo deve essere ridotto e il calcolo iterativo ripetuto. Questa procedura viene solitamente ripetuta e i valori risultanti di C_n sono riportati in funzione della composizione del reattore. La dimensione critica corrisponde al punto in cui $C_n = 1$. Nella Fig. I.4 viene riportato l'andamento di C_n rispetto al raggio del nocciolo in cui, con evidenza, si nota che il reattore è critico per un raggio pari a 21.9 cm.

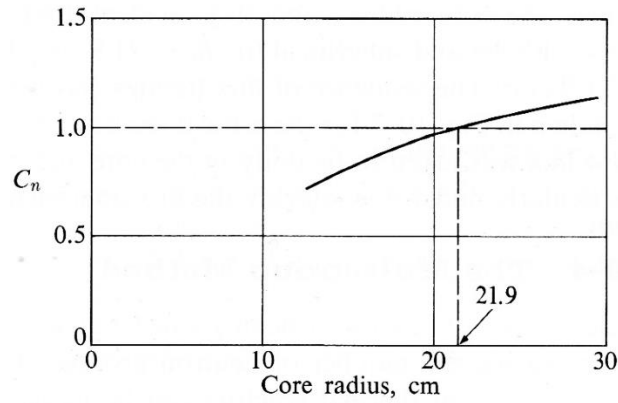


Figura I.4: fattore C_n in un calcolo computazionale iterativo a due gruppi

Le sequenze d'iterazione del flusso vengono presentate in Fig. I.5 per il reattore critico ad acqua e con combustibile ^{235}U discusso nell'esempio numerico di cui sopra. Come si osserva in Fig. I.5, il flusso iniziale lento è stato assunto pari ad uno nel nocciolo e zero nel riflettore.

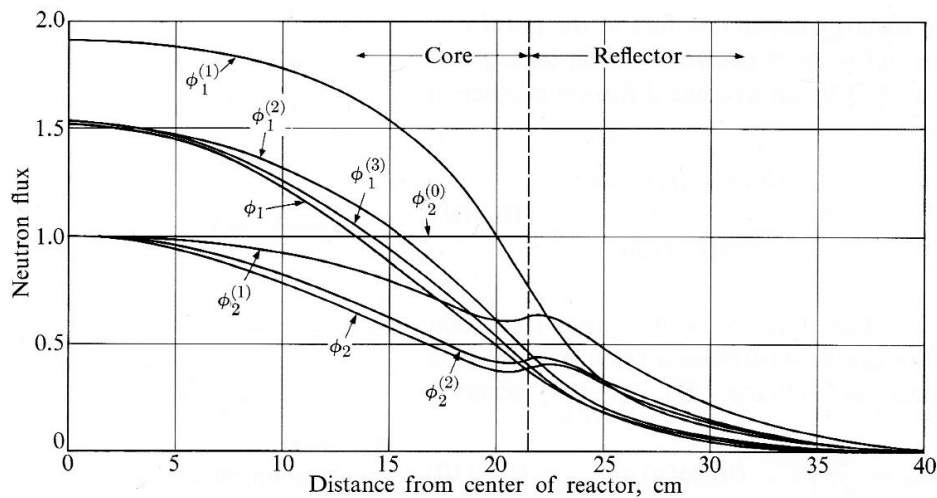


Figura I.5: Iterazione dei flussi in un calcolo iterativo a due-gruppi

In pratica, non è necessario esaminare la dipendenza spaziale di C_n poiché tale parametro converge al fattore di moltiplicazione del sistema in ciascun punto del reattore. Solitamente, con l'obiettivo di migliorare la convergenza del calcolo, viene valutata la quantità integrale:

$$C_n = \frac{\int \phi_i^{(n+1)}(r) dV}{\int \phi_i^{(n)}(r) dV} \quad (I.91)$$

piuttosto che il rapporto dei flussi iterati in un singolo punto. Le tecniche iterative sono utilizzabili per effettuare calcoli sia su reattori uniformi che su reattori non uniformi.

Lista delle Figure

Fig. 0.1: Vista schematica dello slab inferiore di un riflettore pesante – EPR™	2
Fig. 0.2: Vista assonometrica e vista reale del riflettore EPR™	3
Fig. 0.3: Tilt [%] vs potenza del reattore - combustibile a 0 BU.....	4
Fig. 0.4: Tilt [%] vs diagonale NW->SE del nocciolo PWR.....	4
Fig. 0.5: Mappe di potenza termica EPR.....	5
Fig. 1.1: Modelli di riflettore PWR.....	8
Fig. 1.2: Geometria nel calcolo in diffusione secondo il metodo di Reuss-Nissan	13
Fig. 1.3: Geometria utilizzata in diffusione secondo il metodo di Mondot	14
Fig. 2.1: Cella multiregione.....	16
Fig. 2.2: Cella standard.....	16
Fig. 2.3: Spettro di fissione utilizzato in tutte le librerie ENDF presenti in SCALE 6.1.3.....	17
Fig. 2.4: Modellizzazione cella cilindrica nell'approssimazione di Sauer.....	23
Fig. 2.5: Definizione degli intervalli RMI, RP ed RMS.....	28
Fig. 2.6: Diagramma di flusso sequenza CENTRM per la generazione di sezioni d'urto.....	30
Fig. 2.7: Cella rettangolare caratteristica utilizzata nell'approccio SC.....	33
Fig. 2.8: Orientamento dei lati di una cella in riferimento ad una data direzione vettoriale.....	34
Fig. 2.9: Andamento del flusso omogeneo ed eterogeneo in una soluzione multi-assembly.....	36
Fig. 2.10: Condizione al contorno di riflessione su entrambi i lati.....	38
Fig. 2.11: Condizioni al contorno bianche su lato sinistro del sistema.....	38
Fig. 2.12: Condizione al contorno di vuoto sul lato sinistro del sistema.....	38
Fig. 2.13: Condizione al contorno periodica.....	39
Fig. 2.14: Diagramma di flusso della sequenza di calcolo T-NEWT.....	39
Fig. 3.1: Dimensioni geometriche (mm) elemento di combustibile ECO-19.....	45
Fig. 3.2: Dimensioni geometriche del vessel e disposizione elementi ECO nel nocciolo.....	46
Fig. 3.3: Sezione trasversale del riflettore in grafite.....	46
Fig. 3.4: Mesh computazionale e disposizione dei materiali - ECO-19.....	47

Fig. 3.5: Cella elementare ECO-19 (sx) e cella elementare per l'autoschermo (dx).....	48
Fig. 3.6: Piani di flusso veloce e termico - ECO-19.....	48
Fig. 3.7: Profilo di flusso termico e veloce nella zona di mezzeria cella ECO-19.....	49
Fig. 3.8: Spettro critico RB3 e assembly PWR 15x15.....	50
Fig. 3.9: Mesh computazionale sistema cella-riflettore.....	51
Fig. 3.10:Distribuzione dei materiali sistema cella-riflettore.....	51
Fig. 3.11:Mappa di flusso veloce sistema cella-riflettore.....	51
Fig. 3.12:Mappa di flusso termico sistema cella-riflettore.....	51
Fig. 3.13:Mappa di flusso veloce zona cella-grafite.....	52
Fig. 3.14:Mappa di flusso termico zona cella-grafite.....	52
Fig. 3.15:Profili di flusso termico e veloce cella ECO-19.....	52
Fig. 3.16:Profili di flusso termico e veloce sistema cella-riflettore (<i>lin/lin</i>).....	53
Fig. 3.17:Profili di flusso termico e veloce sistema cella-riflettore (<i>log/lin</i>).....	53
Fig. 4.1: Cella di combustibile UO_2	56
Fig. 4.2: Cella $UO_2+Gd_2O_3$	57
Fig. 4.3: Cella tubo guida.....	57
Fig. 4.4: Cella tubo strumentale.....	57
Fig. 4.5: Assembly PWR- TMI-I.....	58
Fig. 4.6: Sistema assembly/riflettore.....	58
Fig. 4.7: Griglia computazionale - assembly/riflettore PWR TMI-I.....	61
Fig. 4.8: Disposizione dei materiali - assembly/riflettore PWR TMI-I.....	61
Fig. 4.9: Rappresentazione geometrica assembly-riflettore TMI-1 - Serpente 2.0.....	61
Fig. 4.10:Geometria assembly-riflettore MCNPX.....	62
Fig. 4.11:Profili di flusso termico e veloce lungo la mezzeria - SCALE 6.1.3.....	63
Fig. 4.12:Mappa di flusso veloce - SCALE 6.1.3.....	64
Fig. 4.13:Mappa di flusso termico - SCALE 6.1.3.....	64
Fig. 4.14:Mappa di flusso termico - Serpent 2.0.....	64

Fig. 4.15: Variazione della Σ_{a2} con la concentrazione di boro.....	68
Fig. 5.1: Geometria e materiali cella di combustibile – RISOM.....	71
Fig. 5.2: Geometria cella di combustibile equivalente – RISOM.....	72
Fig. 5.3: Geometria tubo guida – RISOM.....	73
Fig. 5.4: Geometria equivalente tubo guida – RISOM.....	73
Fig. 5.5: Sezione trasversale del riflettore radiale.....	74
Fig. 5.6: Geometria del riflettore radiale equivalente per il calcolo – RISOM.....	74
Fig. 5.7: Configurazioni geometriche utilizzate per il calcolo.....	75
Fig. 5.8: Griglia computazionale configurazione 1 – RISOM.....	77
Fig. 5.9: Distribuzione dei materiali configurazione 1 – RISOM.....	77
Fig. 5.10: Mappa di flusso veloce configurazione 1 – RISOM.....	77
Fig. 5.11: Mappa di flusso termico configurazione 1 – RISOM.....	78
Fig. 5.12: Profilo di flusso configurazione 1 (lin/lin) – RISOM.....	78
Fig. 5.13: Profilo di flusso configurazione 1 (log/lin) – RISOM.....	78
Fig. 5.14: Griglia computazionale configurazione 2 – RISOM.....	79
Fig. 5.15: Distribuzione dei materiali configurazione 2 – RISOM.....	79
Fig. 5.16: Mappa di flusso veloce configurazione 2 – RISOM.....	79
Fig. 5.17: Mappa di flusso termico configurazione 2 – RISOM.....	80
Fig. 5.18: Profili di flusso termico e veloce configurazione 2 (lin/lin) – RISOM.....	80
Fig. 5.19: Profili di flusso termico e veloce configurazione 2 (log/lin) – RISOM.....	80
Fig. 5.20: Configurazione geometrica sistema combustibile/riflettore – EPRI.....	83
Fig. 5.21: Griglia mesh computazionali sistema <i>omogeneo</i> combustibile/riflettore – EPRI.....	84
Fig. 5.22: Disposizione dei materiali sistema <i>omogeneo</i> combustibile/riflettore – EPRI.....	84
Fig. 5.23: Mappa di flusso veloce sistema <i>omogeneo</i> combustibile/riflettore – EPRI.....	84
Fig. 5.25: Profili di flusso termico e veloce sistema <i>omogeneo</i> – EPRI.....	85
Fig. 5.26: Configurazione geometrica sistema combustibile/riflettore – EPRI.....	85
Fig. 5.27: Griglia mesh computazionali sistema <i>eterogeneo</i> combustibile/riflettore – EPRI.....	86

Fig. 5.28: Disposizione dei materiali sistema <i>eterogeneo</i> combustibile/riflettore – EPRI.....	86
Fig. 5.29: Mappa di flusso veloce sistema <i>eterogeneo</i> combustibile/riflettore – EPRI.....	86
Fig. 5.30: Mappa di flusso termico sistema <i>eterogeneo</i> combustibile/riflettore – EPRI.....	87
Fig. 5.31: Profili di flusso termico e veloce sistema <i>eterogeneo</i> – EPRI.....	87
Fig. 5.32: Confronto profili di flusso casi omogeneo ed eterogeneo.....	88
Fig. 5.33: Profili di flusso veloce sistema <i>omogeneo</i> - casi 7/8", 9/8", 11/8"	91
Fig. 5.34: Profili di flusso termico sistema <i>omogeneo</i> - casi 7/8", 9/8", 11/8"	91
Fig. 5.35: Modello PWR per i calcoli di collassamento – ENEA.....	92
Fig. 5.36: Modello BWR per i calcoli di collassamento – ENEA.....	92
Fig. 5.37: Griglia computazionale sistema assembly/riflettore – PWR.....	94
Fig. 5.38: Disposizione dei materiali sistema assembly/riflettore – PWR.....	94
Fig. 5.39: Mappa di flusso veloce sistema assembly/riflettore – PWR.....	94
Fig. 5.40: Mappa di flusso termico sistema assembly/riflettore – PWR.....	94
Fig. 5.41: Profilo di flusso termico e veloce (<i>lin/lin</i>) – PWR.....	95
Fig. 5.42: Profilo di flusso termico e veloce (<i>log/lin</i>) – PWR.....	95
Fig. 5.45: Griglia computazionale sistema assembly/riflettore – BWR.....	96
Fig. 5.44: Disposizione dei materiali sistema assembly/riflettore – BWR.....	96
Fig. 5.45: Mappa di flusso veloce sistema assembly/riflettore – BWR.....	96
Fig. 5.46: Mappa di flusso termico sistema assembly/riflettore – BWR.....	96
Fig. 5.47: Profilo di flusso termico e veloce (<i>lin/lin</i>) – BWR.....	97
Fig. 5.48: Profilo di flusso termico e veloce (<i>log/lin</i>) – BWR.....	97
Fig. 5.49: Modellizzazione del nocciolo - Benchmark BEARS.....	98
Fig. 5.50: Disposizione degli assembly nel nocciolo - ciclo 1.....	99
Fig. 5.51: Mesh computazionali – BEARS.....	103
Fig. 5.52: Mesh computazionali con borosilicato – BEARS.....	104
Fig. 5.53: Distribuzione dei materiali – BEARS.....	104
Fig. 5.54: Distribuzione dei materiali con borosilicato – BEARS.....	104

Fig. 5.55: Mappa di flusso veloce - gruppo 1.....	105
Fig. 5.56: Mappa di flusso termico - gruppo 8.....	105
Fig. 6.1: Mesh computazionale PWR - riflettore standard.....	107
Fig. 6.2: Distribuzione dei materiali PWR - riflettore standard.....	108
Fig. 6.3: Mappa di flusso veloce - riflettore standard.....	108
Fig. 6.4: Mappa di flusso termico - riflettore standard.....	108
Fig. 6.5: Profili di flusso termico e veloce PWR - riflettore standard.....	109
Fig. 6.6: Mesh computazionali PWR - riflettore pesante.....	109
Fig. 6.7: Distribuzione dei materiali PWR - riflettore pesante.....	110
Fig. 6.8: Mappa di flusso veloce PWR - riflettore pesante.....	110
Fig. 6.9: Mappa di flusso termico PWR - riflettore pesante.....	110
Fig. 6.10: Profili di flusso termico e veloce PWR – riflettore pesante.....	111
Fig. 6.11: Profili di flusso veloce di un PWR con riflettore standard e pesante (<i>lin/lin</i>).....	111
Fig. 6.12: Profili di flusso veloce di un PWR con riflettore standard e pesante (<i>log/lin</i>).....	112
Fig. 6.13: Profili di flusso termico di un PWR con riflettore standard e pesante (<i>lin/lin</i>).....	112
Fig. 6.14: Profili di flusso termico di un PWR con riflettore standard e pesante (<i>log/lin</i>).....	113
Fig. 6.15: Geometria sistema assembly/riflettore pesante.....	115
Fig. 6.16: Mesh computazionali – 0 e 1300 ppm di boro.....	117
Fig. 6.17: Distribuzione dei materiali 0 e 1300 ppm di boro.....	118
Fig. 6.18: Mappa di flusso veloce - 0 ppm di boro.....	118
Fig. 6.19: Mappa di flusso termico – 0 ppm di boro.....	118
Fig. 6.20: Profilo di flusso termico e veloce per le configurazioni a 0 e 1300 ppm di boro.....	119
Fig. 6.21: Mappa di flusso veloce – HFP.....	120
Fig. 6.22: Mappa di flusso termico – HFP.....	121
Fig. 6.23: Profili di flusso termico e veloce - HZP e HFP.....	122
Fig. 6.24: Distribuzione assiale di temperatura - riflettore pesante.....	124
Fig. 6.25: Distribuzione radiale di temperatura - riflettore pesante.....	124

Fig. 6.26: Mesh computazionali riflettore EPR - configurazione omogenea.....	126
Fig. 6.27: Distribuzione dei materiali riflettore EPR - configurazione omogenea.....	126
Fig. 6.28: Mappa di flusso veloce riflettore EPR - configurazione omogenea.....	127
Fig. 6.29: Mappa di flusso termico riflettore EPR - configurazione omogenea.....	127
Fig. 6.30: Reaction rate di assorbimento veloce vs composizione di acciaio.....	128
Fig. 6.31: Reaction rate di assorbimento termico vs composizione di acciaio.....	128
Fig. 6.32: Reaction rate di scattering 1->2 vs composizione di acciaio.....	129
Fig. 6.33: Reaction rate di scattering 2->1 vs composizione di acciaio.....	19
Fig. 6.34: Dimensioni radiali riflettore EPR omogeneizzato a zone – 1A+1R.....	131
Fig. 6.35: Mesh computazionali riflettore EPR omogeneizzato a zone – 1A+1R.....	131
Fig. 6.36: Distribuzione dei materiali riflettore EPR omogeneizzato a zone – 1A+1R.....	132
Fig. 6.37: Mappa di flusso veloce riflettore EPR omogeneizzato a zone -1A+1R.....	132
Fig. 6.38: Mappa di flusso termico riflettore EPR omogeneizzato a zone -1A+1R.....	132
Fig. 6.39: Dimensioni radiali riflettore pesante omogeneizzato a zone - 2A+1R.....	133
Fig. 6.40: Distribuzione mesh computazionali riflettore EPR omogeneizzato a zone - 2A+1R.....	133
Fig. 6.41: Distribuzione dei materiali riflettore EPR omogeneizzato a zone - 2A+1R.....	153
Fig. 6.42: Mappa di flusso veloce riflettore EPR omogeneo a zone - 2A+1R.....	134
Fig. 6.43: Mappa di flusso veloce riflettore EPR omogeneo a zone - 2A+1R.....	134
Fig. 6.44: Nocciolo EPR con disposizione degli assembly in condizioni di BOC.....	135
Fig. 6.45: Dimensioni radiali riflettore pesante omogeneizzato a zone - 8.5A+1R.....	136
Fig. 6.46: Mesh computazionali riflettore pesante omogeneo - 8.5A+1R.....	156
Fig. 6.47: Distribuzione dei materiali riflettore pesante omogeneo - 8.5A+1R.....	136
Fig. 6.48: Mappa di flusso veloce riflettore pesante omogeneo - 8.5A+1R.....	136
Fig. 6.49: Mappa di flusso termico riflettore pesante omogeneo - 8.5A+1R.....	136
Fig. 6.50: Profilo di flusso veloce e termico - 8.5A+1R.....	137
Fig. 6.51: Nocciolo UOX - benchmark UAM.....	138
Fig. 6.52: Disposizione geometrica riflettore EPR - zona di mezzeria.....	138

Fig. 6.53: Mesh computazionali riflettore EPR - configurazione centrale.....	159
Fig. 6.54: Distribuzione dei materiali riflettore EPR - configurazione centrale.....	139
Fig. 6.55: Mappa di flusso veloce riflettore EPR – configurazione centrale.....	139
Fig. 6.56: Mappa di flusso termico riflettore EPR – configurazione centrale.....	140
Fig. 6.57: Profili di flusso veloce e termico (<i>lin/lin</i>) - zona centrale.....	141
Fig. 6.58: Profilo di flusso veloce e termico (<i>log/lin</i>) - zona centrale.....	141
Fig. 6.59: Modellizzazione geometrica a due zone - riflettore EPR.....	142
Fig. 6.60: Mesh computazionali riflettore EPR - zona 3.....	142
Fig. 6.61: Distribuzione dei materiali riflettore EPR - zona 3.....	143
Fig. 6.62: Mappa di flusso veloce riflettore EPR - zona 3.....	143
Fig. 6.63: Mappa di flusso termico riflettore EPR - zona 3.....	143
Fig. 6.64: Profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (<i>lin/lin</i>) - zona 3.....	144
Fig. 6.65: Profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (<i>log/lin</i>) - zona 3.....	144
Fig. 6.66: Mesh computazionali riflettore EPR - zona 4.....	145
Fig. 6.67: Disposizione dei materiali riflettore EPR - zona 4.....	146
Fig. 6.68: Mappa di flusso veloce riflettore EPR - zona 4.....	146
Fig. 7.69: Mappa di flusso termico riflettore EPR - zona 4.....	146
Fig. 6.70: Profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (<i>lin/lin</i>) - zona 4.....	147
Fig. 6.71: Profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (<i>log/lin</i>) - zona 4.....	147
Fig. 6.72: Mesh computazionali riflettore EPR - zona 5.....	148
Fig. 6.73: Distribuzione dei materiali riflettore EPR - zona 5.....	149
Fig. 6.74: Profilo di flusso veloce riflettore EPR - zona 5.....	149
Fig. 6.75: Mappa di flusso termico riflettore EPR - zona 5.....	149
Fig. 6.76: Profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (<i>lin/lin</i>) - zona 5.....	150
Fig. 6.77: Profilo di flusso veloce e termico riflettore EPR (<i>log/lin</i>) - zona 5.....	150
Fig. 6.78: Mesh computazionali riflettore EPR- zona 6.....	151
Fig. 6.79: Distribuzione dei materiali riflettore EPR - zona 6.....	152

Fig. 6.80: Mappa di flusso veloce riflettore EPR - zona 6.....	152
Fig. 6.81: Mappa di flusso termico riflettore EPR - zona 6.....	152
Fig. 6.82: Profili di flusso veloce e termico riflettore EPR (<i>lin/lin</i>) - zona 6.....	153
Fig. 6.83: Profili di flusso veloce e termico riflettore EPR (<i>log/lin</i>) - zona 6.....	153
Fig. 6.84: Mesh computazionali riflettore EPR - zona 7.....	154
Fig. 6.85: Disposizione dei materiali riflettore EPR - zona 7.....	155
Fig. 6.86: Mappa di flusso veloce riflettore EPR - zona 7.....	155
Fig. 6.87: Mappa di flusso termico riflettore EPR - zona 7.....	155
Fig. 6.88: Profilo di flusso termico e veloce riflettore EPR (<i>lin/lin</i>) - zona 7.....	156
Fig. 6.89: Profilo di flusso termico e veloce riflettore EPR (<i>log/lin</i>) - zona 7.....	156
Fig. 6.90: Geometria e distribuzione dei materiali assembly/riflettore EPR - Serpent 2.0.....	158
Fig. 6.91: Mappa di flusso termico sistema assembly/riflettore EPR - Serpent 2.0.....	158
Fig. 6.92: Mesh computazionali - color set 2x2.....	160
Fig. 6.93: Distribuzione dei materiali - color set 2x2.....	160
Fig. 6.94: Mappa di flusso veloce - color set 2x2.....	161
Fig. 6.95: Mappa di flusso veloce - color set 2x2.....	161

Lista delle Tabelle

Tab. 0.1: Valore espresso dal Tilt in un nocciolo PWR diviso in 4 zone simmetriche.....	4
Tab. 2.1: Sequenze funzionali e moduli presenti nella sequenza di calcolo T-NEWT.....	15
Tab. 2.2: Suddivisione degli intervalli energetici in 238 e 44 gruppi nelle librerie di SCALE 6.3.1...	18
Tab. 2.3: Librerie di sezioni d'urto presenti in SCALE per analisi fisica di reticoli.....	21
Tab. 3.1: Parametri fisici Uranio naturale.....	45
Tab. 3.2: Parametri fisici lega d'Alluminio.....	45
Tab. 3.3: Parametri materiali del sistema RB3.....	46
Tab. 3.4: Volumi combustibile e moderatore assembly PWR 17x17 e cella unitaria ECO-19.....	47
Tab. 3.5: Sezioni d'urto efficaci ECO-19 e Assembly 15x15.....	49
Tab. 3.6: Dimensioni medie sistema di schermaggio - RB3.....	51
Tab. 3.7: Sezioni d'urto efficaci sistema ECO-19/riflettore.....	53
Tab. 4.1: Parametri fisici e geometrici della cella UO_2	56
Tab. 4.2: Parametri fisici e geometrici cella $UO_2+Gd_2O_3$	57
Tab. 4.3: Parametri fisici e geometrici tubo guida.....	57
Tab. 4.4: Parametri fisici e geometrici tubo strumentale.....	57
Tab. 4.5: Composizione massica Zircalloy-4.....	57
Tab. 4.6: Geometria e materiale assembly 15x15 TMI-I.....	58
Tab. 4.7: Geometria e materiali assembly/riflettore TMI-I.....	58
Tab. 4.8: Composizione massica acqua ed acciaio.....	58
Tab. 4.9: Condizioni operative del sistema assembly/riflettore.....	59
Tab. 4.10:Struttura a due gruppi delle v7-238.....	59
Tab. 4.11:Opzioni di calcolo utilizzate in T-NEWT.....	60
Tab. 4.12:Coefficiente di moltiplicazione effettivo per il caso [het/het]	63
Tab. 4.13:Risultati ottenuti con SCALE 6.1.3 e SERPENT 2.0.....	65
Tab. 4.14:Risultati ottenuti con SCALE 6.1.3 e SERPENT 2.0.....	65
Tab. 4.15:Risultati presenti in letteratura - DRAGON.....	66

Tab. 4.16: Risultati presenti in letteratura - MCNP5.....	66
Tab. 4.17: Risultati dei casi omogeneo ed eterogeneo.....	67
Tab. 4.18: Risultati per differenti concentrazioni di boro.....	67
Tab. 4.19: Parametri cella PWR Bench. vs SCALE 6.1.3 e SERPENT 2.0 – assembly PWR TMI-I.....	68
Tab. 4.20: Valori dei parametri di cella corretti benchmark - assembly 15x15 PWR TMI-I.....	69
Tab. 4.21: Valori parametri cella Benchmark vs SCALE 6.1.3 E SCALE 6.2 – assembly PWR TMI-I....	70
Tab. 5.1: Composizione atomica materiali - RISOM.....	72
Tab. 5.2: Risultati ottenuti da RISOM e da SCALE 6.1.3.....	81
Tab. 5.3: Risultati delle sezioni d'urto efficaci ottenuti da SCALE 6.1.3.....	81
Tab. 5.4: Dimensioni geometriche cella di combustibile.....	82
Tab. 5.5: Composizione dei materiali presenti nel sistema combustibile/riflettore – EPRI.....	82
Tab. 5.6: Suddivisione degli intervalli energetici nel collassamento a 4 e 2 gruppi.....	83
Tab. 5.7: Flussi veloce e termico nella configurazione omogenea ed eterogenea – EPRI.....	87
Tab. 5.8: Rapporto tra flusso veloce e termico all'interfaccia combustibile/riflettore – EPRI.....	88
Tab. 5.9: Confronto valori di sezioni d'urto efficaci SCALE - EPRI caso <i>omogeneo</i>	89
Tab. 5.10: Confronto valori di sezioni d'urto efficaci SCALE - EPRI caso <i>eterogeneo</i>	89
Tab. 5.11: Confronto valore delle sezioni d'urto efficaci SCALE/EPRI - caso 9/8".....	90
Tab. 5.12: Confronto valore sezioni d'urto efficaci SCALE/EPRI - caso 11/8".....	90
Tab. 5.13: Condizioni geometriche, materiali ed operative – ENEA.....	93
Tab. 5.14: Sezioni d'urto efficaci configurazioni BWR e PWR - SCALE 6.1.3.....	97
Tab. 5.15: Parametri assembly di combustibile – BEARS.....	99
Tab. 5.16: Geometria e materiali pin di combustibile – BEARS.....	100
Tab. 5.17: Composizione atomica UO ₂ - 3.1 w/o.....	100
Tab. 5.18: Composizione atomica elio.....	120
Tab. 5.19: Composizione atomica zircaloy-4.....	100
Tab. 5.20: Composizione geometrica tubo guida.....	101
Tab. 5.21: Composizione geometrica tubo strumentale.....	101

Tab. 5.22:Composizione geometrica pin di borosilicato.....	101
Tab. 5.23:Composizione acqua borata.....	102
Tab. 5.24:Composizione aria.....	102
Tab. 5.25:Composizione geometrica e materiale del riflettore.....	102
Tab. 5.26:Discretizzazione energetica delle librerie di sezioni d'urto ad 8 gruppi.....	103
Tab. 5.27:Sezioni d'urto efficaci – BEARS.....	105
Tab. 6.1: Dati di cella - riflettore standard e pesante.....	113
Tab. 6.2: Flussi veloci e termici in un PWR con riflettore standard e pesante.....	114
Tab. 6.3: Analisi dei parametri di convergenza numerica.....	115
Tab. 6.4: Coeff. di moltiplicazione e flussi al variare dell'ordine di quadratura e di scattering.....	116
Tab. 6.5: Andamento del keff al variare delle mesh computazionali.....	117
Tab. 6.6: Sezioni d'urto efficaci omogenee a 0 e 1300 ppm di boro.....	119
Tab. 6.7: Condizioni operative HZP e HFP.....	120
Tab. 6.8: Sezioni d'urto efficaci omogenee - HZP e HFP.....	122
Tab. 6.9: Sezioni d'urto efficaci omogenee vs librerie di sezioni d'urto.....	122
Tab. 6.10:Confronto sezioni d'urto efficaci vs librerie di sezioni d'urto.....	123
Tab. 6.11:Dati di cella al variare della temperatura del riflettore.....	125
Tab. 6.12:Variazione relativa tra le diverse configurazioni termiche di riflettore EPR.....	125
Tab. 6.13:Dati di cella configurazione hom/hom e configurazione het/hom.....	127
Tab. 6.14:Keff vs percentuale volumetrica di acciaio nel riflettore.....	129
Tab. 6.15:Dati di cella al variare della concentrazione volumetrica di acciaio nel riflettore.....	130
Tab. 6.16:Dati di cella riflettore pesante omogeneo - 1A+2R.....	134
Tab. 6.17:Parametri di cella configurazione 8.5A+1R.....	137
Tab. 6.18:Dati di cella riflettore EPR – due zone.....	140
Tab. 6.19:Parametri di cella riflettore EPR - zona 3.....	145
Tab. 6.20:Parametri di cella riflettore EPR - zona 4.....	148
Tab. 6.22Parametri di cella riflettore EPR – zona 6.....	154

Tab. 6.23:Parametri di cella - zona 7.....	157
Tab. 6.24:Dati di cella SCALE 6.1.3 vs SERPENT 2.0.....	159
Tab. 6.25:Parametri di cella riflettore EPR - color set 2x2.....	162
Tab. I.1: Costanti di gruppo per diversi moderatori.....	166
Tab. I.2: Funzioni di nocciolo a due gruppi per diverse geometrie.....	168
Tab. I.3: Funzioni di riflettore a due gruppi per diverse geometrie.....	170
Tab. I.4: Funzioni per il determinante critico.....	172

Bibliografia

- [1] G. Glinatsis, G. Grasso, R. Pergreffi, F. Rocchi *“Problemi di fisica del reattore ad acqua leggera e metodi di calcolo neutronico avanzati”*, report ENEA NNFISS – LP5 – 022, Settembre 2011.
- [2] Kohei Takamuku, *“Analysis of Flow and Heat Transfer in the U.S. EPRTM Heavy Reflector”*, Virginia Polytechnic Institute and State University, December 5 – 2008.
- [3] A. Sargeni, K.W. Burn, *“Coupling effects in large reactor cores: the impact of heavy and conventional reflectors on power distribution perturbations”* PHYSOR 2014–The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future, The Westin Miyako, Kyoto, Japan, September 28 – October 3, 2014.
- [4] F. Rocchi, R. Pergreffi, F. Boreicha, A. Sargeni, G. Bruna *“Azimuthal Power Disequilibrium Estimate through Control Rod Worth Measurement for GEN III+ PWRs”*, Proceedings of ICAPP 2015 May 03-06 – Nice (France) Paper 15385.
- [5] J. R. Lamarsh *“Introduction to Nuclear Reactor Theory”*, Addison – Wesley Publishing Company, Inc, 1966.
- [6] I. Vilardi, C. M. Castellani, D. M. Castelluccio, *“Programma della sorveglianza fisica ambientale e personale della radioprotezione durante la disattivazione dell’impianto nucleare di ricerca RB-3 dell’ENEA a Bologna - Montecuccolino.”*
- [7] K. Ivanov, M. Avramova, S. Kamerow I. Kodeli, E. Sartori, E. Ivanov, O. Cabellos *“Benchmarks for Uncertainty Analysis in Modelling (UAM) for the design, operation and safety analysis of LWRs”* - Volume I: Specification and Support Data for Neutronics Cases (Phase I). Version 2.1 (Final Specification), OECD Nuclear Energy Agency, Maggio 2013.
- [8] B. J. Ade, *“Scale/Triton PRimer: A Primer for Light Water Reactor Lattice Physics Calculations”*, Oak Ridge National Laboratory, November 2012.
- [9] N. Bejaoui *“Simulation Numérique de l’Effet du Réflecteur Radial sur les Cellules REP en Utilisant les Codes Dragon et Donjon”* These Université de Montréal, Décembre 2012.
- [10] S. O. Gürdal, M. Tombakoğlu, *“Two-group Diffusion Parameters for LWRs”*, Int. Conf. Nuclear Energy for New Europe NENE 2009, Bled, Slovenia, September 14-17, 2009.

- [11] Ryan N. Bratton, M. Avramova e K. Ivanov, *“OECD/NEA Benchmark for Uncertainty Analysis in Modeling (UAM) for LWRs – Summary and discussion of Neutronics Case (phase I)”*, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, 206 Reber Building, State College, Pennsylvania 16802-1412, USA. Nuclear Engineering and Technology, Vol. 46 No. 3 June 2014.
- [12] A. Labarile, N. Olmo, R. Miró, T. Barrachina, G. Verdú, *“Uncertainty Analysis in Reactor Physics Modelling in the Framework of UAM-Benchmark using SERPENT and SCALE-6.2 for Transport Calculations and TSUNAMI and SAMPLER for Cross Section Perturbation”*. Institute for Industrial, Radiophysical and Environmental Safety (ISIRYM) Universitat Politècnica de València Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, Spain. Proceedings n° 608 of 23rd International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE2014) – Portoròz, Slovenia September 8-11 2014.
- [13] Bjorn Thorlasken, *“Construction of PWR Nuclear Cross Sections for transient calculations. Test of the Anti Program against Twodim”*, RISO National Laboratory, DK 4000 Roskilde, Denmark – RISO-M-2264, May 1981.
- [14] W. J. Eich, M. Williams, *“Few-Group Baffle and/or Reflector Constants for Diffusion Calculation Application”*, Electric Power Research Institute (EPRI), 3412 Hilview Avenue Palo Alto California 94304 – Special Report August 1984.
- [15] M. Pescarini, F. Padoani, P. Meloni, *“BUGJEFF311.BOLIB – A JEFF-3.1.1 Broad-Group Coupled (47 n + 20 γ) Cross Section Library in FIDO-ANISN Format for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications”*, rapporto tecnico ENEA – Marzo 2013.
- [16] Nicholas Horelik, Bryan Herman, *“Benchmark for Evaluation And Validation of Reactor Simulation”* MIT Computational Reactor Physics Group”, RELEASE rev. 1.1.1 – October 30, 2013.
- [17] M. Fatone, L. Teunckens, *“Spatial meshing effect and reflector treatment in PWR core modeling”*, Department of Nuclear Technology Täfernstrasse 26, 5405 Baden, Switzerland - International Conference on Mathematics, Computational Methods & Reactor Physics (M&C 2009)
- [18] Kohei Takamuku, *“Analysis of Flow and Heat Transfer in the U.S. EPR™ Heavy Reflector”*, thesis of Virginia Polytechnic Institute and State University - December 5 2008.
- [19] C. Sandrin, R. Sanchez, F. Dolci, *“An Analysis of Reflectro Homogenization Techniques for full Core Diffusion Calculation”*, Nuclear Science and Engineering 168, 59-72 (2011).

- [20] D. V. Colameco, "Improved reflector modeling for light water reactor analysis", thesis in Nuclear Engineering at the Pennsylvania State University, May 2010.
- [21] K. S. SMITH, "Assembly homogenization techniques for Light Water Reactor analysis" Progress in Nuclear Energy, Vol. 17, No. 3, pp. 303-335, 1986.
- [22] Jean C Ragusa, "Steady State Analysis of Multigroup Diffusion and SPn Methods in an MSLB-Like Situation Using the Cronos Code" CEA-Saclay Direction de l'Energie Nucléaire, Nuclear Mathematical and Computational Sciences: A Century in Review, A Century Anew Gatlinburg, Tennessee, April 6-11, 2003.
- [23] Z. Zhong and T. Downar, M. DeHart, "Benchmark the U.S. NRC neutronics codes NEWT and PARCS with the VENUS-2 MOX critical experiments", School of Nuclear Engineering Purdue University and Nuclear Science and Technology Division Oak Ridge National Laboratory - Nuclear Mathematical and Computational Sciences: A Century in Review, A Century Anew Gatlinburg, Tennessee, April 6-11, 2003,
- [24] Y. Tahara, T. Kanagawa, H. Sekimoto, "Two-Dimensional Baffle/Reflector Constants for Nodal Code in PWR Core Design", Mitsubishi Heavy Industries - Ltd, and Tokyo Institute of Technology, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 37, No. 11, p. 986-995 (November 2000).
- [25] G. Sengler, F. Foret, G. Schlosser, R. Lisdat, S. Stelletta, "EPR core design" - Nuclear Engineering and Design 187 (1999) 79–119.
- [26] Y. Tahara, H. Sekimoto, Y. Miyoshi, "Reactivity Effects of Iron Reflector in LWR Cores", Mitsubishi Heavy Industries - Ltd, Tokyo Institute of Technology and Japan Atomic Energy Research Institute - Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 38, No. 2, p. 102-111 (February 2001).
- [27] Klas Jareteg, Paolo Vinai, Christophe Demazière, "Fine-mesh deterministic modeling of PWR fuel assemblies: Proof-of-principle of coupled neutronic/thermal-hydraulic calculations", Division of Nuclear Engineering, Department of Applied Physics, Chalmers University of Technology, SE-412 96 Gothenburg, Sweden - Annals of Nuclear Energy 68 (2014) 247–256.
- [28] Y. Tahara, H. Sekimoto, "Transport Equivalent Diffusion Constants for Reflector Region in PWRs" - Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 39, No. 7, p. 716-728 (July 2002).

- [29] A. Vasiliev, H. Ferroukhi, M. A. Zimmermann, R. Chawla, *“Development of a CASMO-4/SIMULATE-3/MCNPX calculation scheme for PWR fast neutron fluence analysis and validation against RPV scraping test data”* - Annals of Nuclear Energy 34 (2007) 615–627.
- [30] E. Altstadt, H. Kumpf, F.-P. Weiss, E. Fischer, G. Nagel, G. Sgarz, *“Analysis of a PWR core baffle considering irradiation induced creep”* - Annals of Nuclear Energy 31 (2004) 723–736.
- [31] H. Golfier, C. Poinot-Salanon, A. Nicola, J. Taieb, R. Enderle, *“Deterministic and Monte-Carlo calculation schemes of the EPR core and its heavy steel reflector”* - PHYSOR-2006, ANS Topical Meeting on Reactor Physics.
- [32] E. Z. Müller, *“Environment-Insensitive Equivalent Diffusion Theory Group Constants for Pressurized Water Reactor Radial Reflector Regions”*, Nuclear Science and Engineering: 103, 359-376 (1989).
- [33] Richard Sanchez, Jean Ragusa and Simone Santandrea, *“Reflector Homogenization”*, Congreso Internacional Conjunto Cancún 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR/International Joint Meeting Cancun 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR XV Congreso Anual de la SNM y XXII Reunión Anual de la SMSR/XV SNM Annual Meeting and XXII SMSR Annual Meeting Cancún , Q.R., México, 11-14 de Julio, 2004/Cancun, Q.R., Mexico, July 11-14, 2004.
- [34] K. Khattab, I. Khamis, *“Sensitivity analysis of reflector types and impurities in 10 MW MTR type nuclear research reactor”* – Indian Journal of Pure & Applied Physics, Vol. 45, June 2007, pp. 491-495.
- [35] A. C. da Silva, A. S. Martinez, A. da Cruz Gonçalves, *“Reconstruction of the Neutron Flux in a Slab Reactor”* - World Journal of Nuclear Science and Technology, 2012, 2, 181-186.
- [36] P.C. Kalambocas, A. F. Henry, *“The Representation of Light-Water Reflectors by Boundary Conditions”* – Nuclear Science and Engineering: 61, 181-194 (1976).
- [37] Y. Chao, C. Suo, *“A Two Dimensional Two-Group Albedo Model for Pressurized Water Reactor Reflector”* - Nuclear Science and Engineering: 88, 1803-109 (1984).
- [38] W. J. Eich, M. L. Williams, C. Peng, *“Determination of Effective Reflector and Baffle/Reflector Constants for Few-Group Diffusion Calculations”* - Nuclear Science and Engineering: 90, 127-139 (1985).

- [39] M. Segev, "Application of Light Water Reactor Core/Reflector Boundary Conditions" – Nuclear Science and Engineering: 90, 221-230 (1985).
- [40] E. Temesvári, M. Makai, "Boundary Conditions to Describe the Reactor Reflector" – Nuclear Science and Engineering: 110, 262-274 (1992).
- [41] F. Rocchi, M. Sumini, A. Guglielmelli "*Scale 6.1 evaluation of the effective cross sections of a LWR assembly-reflector model with application to NEA TMI-1 PWR Benchmark*", proceeding No. 211 of International Conference Nuclear Energy for New Europe – NENE2014 – Portoroz, Slovenia 8-11 September 2011.